

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program: MN2301 Strojní inženýrství

Obor: 2303 T 002 Strojírenská technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

VLIV LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ NA STRUKTURU OCELI LASER CUTTING INFLUENCE ON STEEL STRUCTURE

Bc. Lucie Vrábelová

KMT - 266

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Karel Daďourek, CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	:	76
Počet tabulek	:	15
Počet obrázků	:	60
Počet příloh	:	5

Datum: 4. 1. 2010

ANOTACE
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní
Katedra materiálů

Studijní program: MN2301 Strojní inženýrství
Obor: 2303 T 002 Strojírenská technologie
Zaměření: Materiálové inženýrství

Diplomant: Bc. Lucie Vrábelová
Téma práce: Vliv laserového řezání na strukturu oceli
Laser Cutting Influence On Steel Structure
Číslo DP: KMT - 266
Vedoucí DP: doc. Ing. Karel Daďourek, CSc.

Abstrakt:

Rychlost laserového řezání materiálů ovlivňuje jednak jakost výsledného výpalku, ale přímo souvisí i s jeho konečnou cenou.

Tato diplomová práce hodnotí aspekty rychlosti řezání laserem. Hodnocen je jednak vliv rychlosti řezání laserem na drsnost, mechanické vlastnosti, mikrotvrdost a mikrostrukturu řezaných vzorků.

Abstract:

Laser cutting speed influences final product quality and is connected with his final price.

This thesis evaluates laser cutting speed aspects from sight of sample surface roughness, mechanical properties, micro roughness and microstructure.

Klíčová slova: řezání laserem, tepelně ovlivněná oblast, mikrotvrdost, mikrostruktura, drsnost

Keywords: laser cutting, heat affected zone, microroughness, microstructure, roughness

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.)

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 4. 1. 2010

Podpis

Poděkování:

Za mnohé konzultace týkající se problematiky, kterou tato práce řeší, dohled nad tvorbou této práce a za formování myšlenek nabytých během studia děkuji především doc. Ing. Karlu Daďourkovi, CSc. Poděkování rovněž směřuje Ing. Radku Týblovi, který umožnil práci s laserem Trumatic HSL 4002C ve firmě TRUMPF a poskytl rovněž cenné informace a dal tak vzniknout nedílné části této diplomové práce. Poděkování patří i katedře KSP, především Ing. Jiřímu Bobkovi a Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.d., kteří mi umožnili práci v laboratoři zkoušení kovů a poskytli důležité informace k sestavení mé práce.

Na závěr, avšak jistě v neposlední řadě, děkuji všem členům KMT, kteří přímo či nepřímo umožnili nejen tvorbu diplomové práce, ale i studium v tomto zaměření.



OBSAH:

1	ÚVOD	10
2	TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1	ŘEZÁNÍ LASEREM	12
2.1.1	TECHNOLOGIE DĚLENÍ MATERIÁLU LASEREM	13
2.1.2	ŠÍŘENÍ LASEROVÉHO SVAZKU V ŘEZACÍM STROJI	15
2.1.3	PŘÍČNÝ PROFIL SVAZKU	21
2.2	TECHNOLOGICKÉ HODNOCENÍ ŘEZÁNÍ LASEROVÝM PAPEREM	22
2.2.1	ŠÍŘKA ŘEZU	23
2.2.2	TEPELNĚ OVLIVNĚNÁ OBLAST	23
2.2.3	DRSNOST POVRCHU	24
2.2.3.1	DRSNOST POVRCHU PŘI ŘEZÁNÍ LASEREM	26
2.2.4	FOKUSACE	27
2.3	STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM	29
2.4	MIKROTVRDOST	29
2.5	CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ POUŽITÝCH PRO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
2.5.1	MATERIÁL TWIP	30
2.5.1.1	POUŽITÍ MATERIÁLU TWIP 1200	32
2.5.1.2	CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU TWIP 1200	32
2.5.2	MATERIÁL DOCOL 1200M	32
2.5.2.1	CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU DOCOL 1200M	33
2.5.3	MATERIÁL BTR 165	33
2.5.4	MATERIÁL DC01A	34
2.6	CHEMICKÉ SLOŽENÍ A MECH. VLASTNOSTI OCELÍ	34
	POUŽITÝCH PRO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	35
3.1	VOLBA MATERIÁLŮ	35
3.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ	35
3.3	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A JEHO PARAMETRY	37
3.3.1	PARAMETRY LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ	38
3.4	STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM - MĚŘENÍ	38
3.5	MĚŘENÍ DRSNOSTI ŘEZANÉHO POVRCHU	40
3.6	PŘÍPRAVA METALOGRAFICKÝCH VÝBRUSŮ	41
3.7	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI	42
4.	HODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKY	44
4.1	VÝSLEDKY STATICKÉ ZKOUŠKY TAHEM	44
4.2	SNÍMKY POVRCHŮ PO ŘEZÁNÍ LASEREM	55
4.3	VÝSLEDKY ZKOUŠKY DRSNOSTI	57



4.4 VÝCHOZÍ STAV POUŽITÝCH MATERIÁLŮ – STRUKTURA, TVRDOST	61
4.5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZY TEPELNĚ OVLIVNĚNÉ OBLASTI A MIKROTVRDOSTI	64
5. ZÁVĚR	73
6. SEZNAM LITERATURY	77



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ:

CO ₂ laser	plynový laser	
d	průměr svazku v ohnisku	[mm]
M ²	faktor kvality svazku	[-]
λ	vlnová délka záření	[nm]
F	ohnisková vzdálenost čočky	[mm]
D	průměr svazku v optickém systému	[mm]
z _f	hloubka ostrosti	[mm]
TEM	příčný elektromagnetický mód	
m, n	počet uzlů pole v příčném směru osy x, počet uzlů ve směru osy y	[-]
R _a	střední aritmetická drsnost	[μm]
R _z	výška nerovností určená z 10-ti bodů	[μm]
R _y	největší výška profilu	[μm]
R _p	největší výška výstupků profilu	[μm]
R _m	největší hloubka prohlubní profilu	[μm]
m	střední čára profilu	[-]
V _{max}	největší rychlost při které ještě dojde k oddělení materiálu při řezání laserem	[mm·min ⁻¹]
V _(Rz,min)	rychlost při níž je dosaženo nejmenší drsnosti povrchu řezné hrany	[mm·min ⁻¹]
L ₀	počáteční měřená délka	[mm]
S ₀	počáteční příčný průřez zk. vzorku	[mm ²]
HV	tvrdost podle Vickerse	[HV]
HV 0,05; (HV 0,3)	mikrotvrdost při zatížení 0,05 N, (mikrotvrdost při zatížení 0,3N)	[HV0,05] [HV0,3]
TWIP	Twinning Induced Plasticity	[-]
SFE	energie vrstvené chyby	[mJ/m ²]
A _x (A ₂₀ , A ₈₀)	tažnost	[%]
R _{p0,2}	nevýrazná (smluvní) mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
n	exponent deformačního zpevnění	[-]



TIG	způsob svařování (Titan Inert Gas)	[-]
TLF	Trumpf Laser frekvenčně buzený	[-]
v_1, v_2, v_3	rychlosti při řezání laserem	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
L_t	měřená délka při měření drsnosti	[mm]
v_t	rychlost měření	[mm/s]
v_b	typ snímače	$[\mu\text{m}]$
DP	Dual Phase (dvoufázové oceli)	[-]
TRIP	TRansformation Induced Plasticity	[-]



1 ÚVOD

Řezání laserem je jednou z progresivních metod dělení materiálu především pro tloušťky materiálů do 25 mm. Ne zcela kompletní znalosti o závislostech kvality řezu a výsledných vlastnostech laserem řezaných dílů na řezných podmínkách byly důvodem vzniku této diplomové práce. Z odborných publikací je možné čerpat informace o parametrech laserového řezání, jako jsou: Rychlost řezání, fokusace, druh řezacího plynu a tlak řezného média. Povědomost o tom, co se děje s materiálem, který je řezán laserem a navíc při různých parametrech řezání, je relativně malá a mnohdy nepřesná.

Prvním cílem diplomové práce je popis technologie řezání ocelí laserem. V této části práce je popsána technologie dělení materiálu laserem včetně základních parametrů laserového řezání, jako je: Šíření laserového svazku v řezacím stroji, příčný profil laserového svazku či fokusace.

Experimentální část diplomové práce se zaměřuje na analýzu vlivu změny technologických parametrů při laserovém řezání na výsledné strukturní a mechanické vlastnosti řezaného materiálu. S ohledem na rozsah této práce byla rychlost řezání zvolena jako parametr, v jehož závislosti jsou posléze vyjadřovány mechanické vlastnosti materiálu (napětí na mezi kluzu, napětí na mezi pevnosti a tažnost), drsnost povrchu řezné hrany, mikrotvrdost a mikrostruktura. Důvodem výběru rychlosti jako variabilního parametru procesu řezání laserem je zejména skutečnost, že se nejvíce podílí na výsledné produktivitě řezání, kdy je zřejmé, že průmyslová praxe vyžaduje hodnoty tohoto parametru pokud možno co nejvyšší. Tato snaha musí být ovšem v souladu se znalostí dopadu rychlosti řezání laserem na výsledné užité vlastnosti finálních výrobků či polotovarů pro další zpracování zhotovených technologií řezání laserem. Předpokládá se, že uvedený variabilní parametr (rychlost řezání) ovlivňuje kvalitu řezu, strukturu materiálu v oblasti řezu a hloubku tepelně ovlivněné oblasti jakožto složky výsledných užitečných a mechanických vlastností laserově řezaných dílů.

Pro zvýšení vypovídací hodnoty učiněných závěrů uvedených v této diplomové práci byly experimentální analýze podrobeny čtyři druhy materiálů vybraných z téměř kompletní škály nejčastěji v rámci laserového řezání používaných typů materiálů. Vždy se jedná o ocel jako nejčastěji laserově dělený materiál. Zástupcem klasických ocelí běžné kvality je ocel DC01A. Vysokopevnostní materiály



reprezentuje materiál s obchodním názvem DOCOL 1200M a BTR165. Ocel BTR 165 byla navíc použita ve dvou provedeních – žíhaná a termomechanicky zpracovaná. Zástupcem moderních ocelí, jejichž plnohodnotné využití v průmyslové praxi se teprve testuje např. v automobilovém průmyslu, je tzv. ocel TWIP. Tloušťka řezaných materiálů byla s ohledem na technické a logistické možnosti zvolena 2 mm a 1,5 mm.

Pro výše zmíněné analýzy vlastností a jejich případné změny s ohledem na změnu rychlosti řezání byly laserovým řezáním vyrobeny vzorky pro zkoušení drsnosti, mikrotvrdosti, mikrostruktury a statickou zkoušku tahem. Statická zkouška tahem byla provedena s ohledem na zjištění případné spojitosti mezi pravděpodobně ovlivněnou drsností povrchu, tepelně ovlivněnou oblastí a mechanickými hodnotami materiálu. Důvodem provedení analýzy této případné souvislosti je firemní požadavek fy TRUMPF na ověření možnosti výroby zkušebních vzorků pro statickou zkoušku tahem pomocí laserového řezání bez dalšího opracování vzorků, které jinak předepisuje norma. Motivem je relativně velká četnost provádění uvedené zkoušky v souvislosti s interním ověřováním jednotlivých šarží materiálů, kdy je kladen samozřejmě důraz na co nejefektivnější výrobu těchto vzorků, jejichž „normovaná“ výroba je nejen časově náročnější, ale samozřejmě i nákladnější. V případě odhalení (učiněné porovnáním naměřených hodnot a hodnot z materiálových listů příslušných materiálů) necitlivosti mechanických vlastností na způsob výroby vzorků (v tomto případě laserové řezání), by se dražší a časově náročnější výroba „normovaných“ vzorků aplikovala pouze u interně odhalených neshodných šarží pro účely konfrontace s dodavatelem příslušného materiálu a celý tento proces by se tím stal ekonomicky efektivnějším a rychlejším.



2 TEORETICKÁ ČÁST

Základní rozdělení způsobů dělení materiálu, je mechanické dělení a tepelné dělení materiálu.

Mechanické dělení - nejčastěji stříhání - se v praxi využívá při dělení plechu do pevnosti přibližně 700 MPa a do tloušťky 1,5 mm.

Základními druhy tepelného dělení jsou řezání materiálu kyslíkem, řezání plazmou a řezání laserem. Každá z těchto technologií má své klady i zápory. Při řezání kyslíkem je velká výhoda možnosti řezání materiálu velkých tloušťek a to až 300 mm. Řezání takovýchto tloušťek neumožňuje ani řezání plazmou ani řezání laserem. Plazmové řezání je velmi produktivní při řezání menších a středních tloušťek cca do 50 mm. Nevýhodou plazmového řezání je nižší kvalita řezu, daná jeho drsností a úhlem podkosu ($2^\circ \div 4^\circ$). Řezání laserem je vhodné pro všechny typy konstrukčních materiálů. Omezením je tloušťka materiálu. Nelegované oceli jsou řezatelné laserem do tloušťky 25 mm, korozivzdorné oceli a slitiny hliníku do 15 mm. Výhodou řezání laserem je velká rychlost řezání, prakticky nulové deformace plechů a vynikající kvalita řezu.

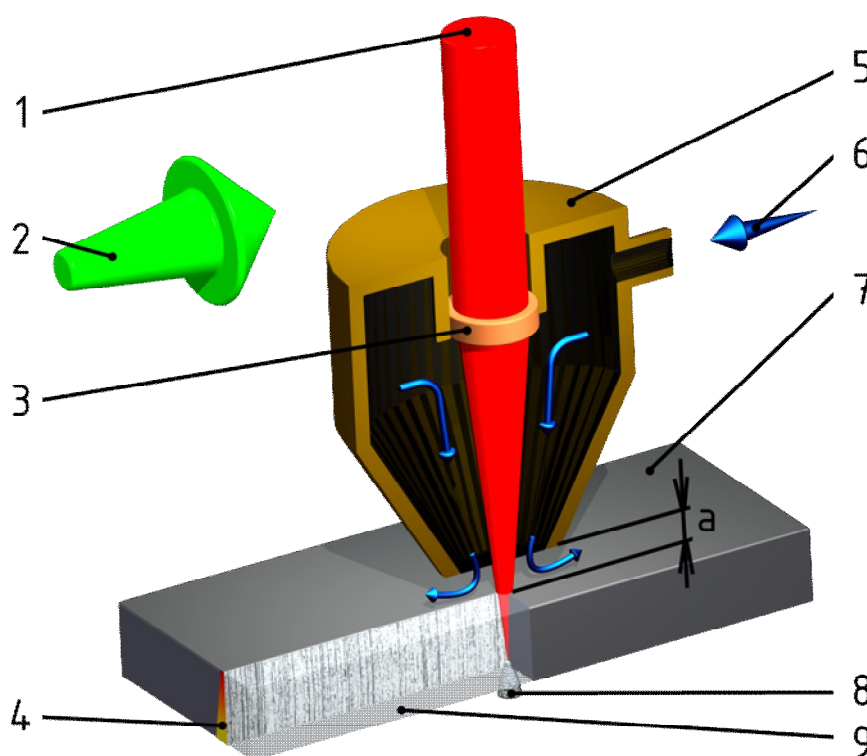
2.1 ŘEZÁNÍ LASEREM

Laser (z anglického **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, tj. zesilování světla stimulovanou emisí záření) je optický zdroj elektromagnetického záření tj. světla v širším smyslu. Světlo je z laseru vyzařováno ve formě úzkého svazku. Na rozdíl od světla přirozených zdrojů je koherentní a monochromatické.
/16/

Laserové řezání je technologie tepelného dělení materiálu, kterou je již dnes díky masivnímu rozšíření možné označit slovem standardní. Strojírenská výroba, zpracovávající plechy o tloušťkách do 15 mm – 25 mm, se již dnes bez laserového řezání neobejde. S řezacími lasery se můžeme setkat jak přímo ve firmách, vyrábějících vlastní finální výrobky, tak ve specializovaných subdodavatelských společnostech, dodávajících laserové výpalky k dalšímu zpracování jako polotovary. Bezpochyby nejrozšířenějším typem průmyslových řezacích laserů jsou CO₂ systémy pracující s vlnovou délkou 10,640 μm. /2/

2.1.1 TECHNOLOGIE DĚLENÍ MATERIÁLU LASEREM

Technologie tepelného dělení materiálu laserem je podobně jako většina laserových procesů založena na vysoké hustotě výkonu, produkovaného laserovým zařízením. Díky této vlastnosti dochází po dopadu svazku na materiál k jeho prudkému ohřevu, natavení a odpaření. Z fyzikálního hlediska jsou známy tři způsoby vytváření řezné spáry: Pomocí spalování materiálu, jeho odtavení a vyfukování taveniny z místa řezu a část materiálu se odpaří. Na tomto základu pracují všechny řezací lasery. Pro odstraňování taveniny, oxidů a výparů se používá asistenčních plynů, které jsou vháněny do místa řezu tryskou, jejímž středem zároveň prochází zaostřený laserový svazek (viz obr. 2.1). Jako asistenční (tzv. řezací) plyn se používá kyslík nebo dusík a pro speciální materiály např. argon.



Obr. 2.1 – Princip řezání laserem. /2/

1 - laserový svazek, 2 - směr řezání, 3 - fokusační optika, 4 - hloubka fokusace, 5- tryska,
6 - přívod asistenčního plynu, 7- řezaný materiál, 8- roztavený kov, oxidy, 9- povrch řezu,
a - vzdálenost mezi tryskou a materiálem

Užití kyslíku jako řezacího plynu je výhodné u materiálů řezatelných kyslíkem, kdy spalování napomáhá vytváření řezné spáry a zvyšuje tak efektivitu řezacího procesu. V praxi se kyslík používá pro řezání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. U vysokolegovaných ocelí způsobuje kyslík vznik těžko odstranitelné strusky v oblasti řezných hran. Řezání slitin hliníku kyslíkem přináší o cca 25 % – 30 % vyšší rychlost řezání než dusík, naproti tomu ovšem stojí snižená kvalita řezu (oxidy na hraně řezu, vysoká drsnost, snižená svařitelnost, zhoršení mechanických vlastností atd.). Pro laserové řezání kyslíkem se nastavují tlaky od 1,5 bar do 5 bar podle řezané tloušťky materiálu.

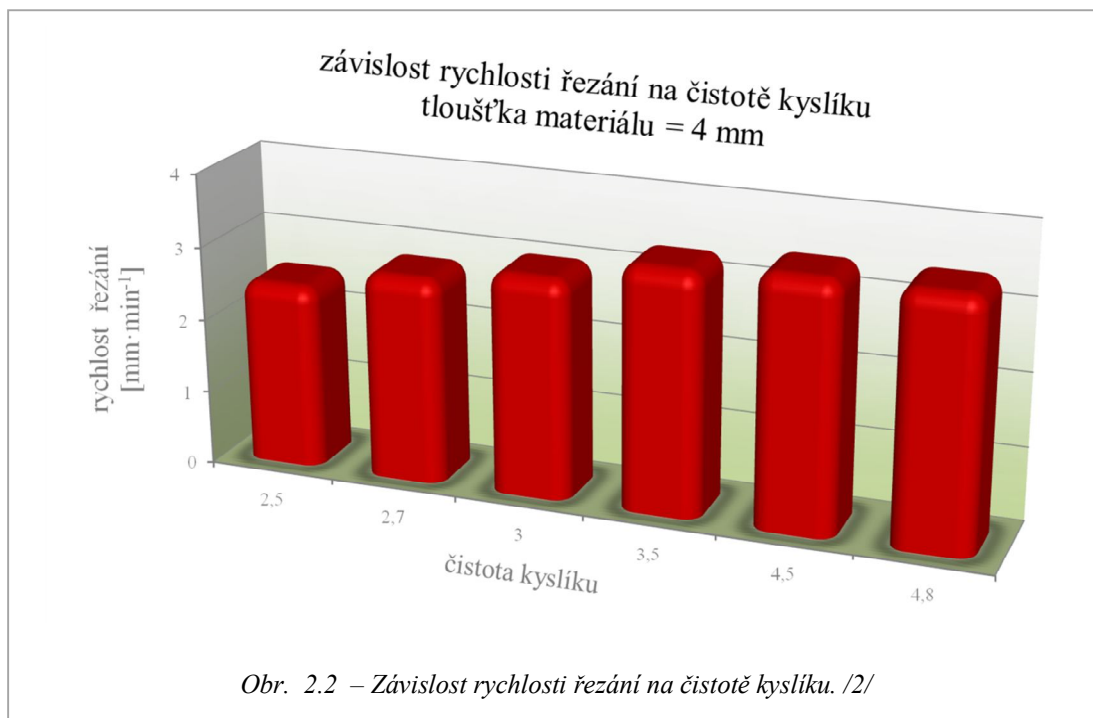
Pro řezání vysokolegovaných ocelí a slitin hliníku je vhodné nasazení dusíku. Oproti kyslíku je snížena rychlost řezání a maximální řezatelná tloušťka, což lze částečně kompenzovat zvýšením tlaku asistenčního plynu. Řezné hrany jsou bez oxidů a strusky a jsou kovově lesklé. Dusík slouží jako asistenční plyn rovněž pro řezání plastů, textilií, keramiky, dřeva a papíru. V současnosti vyráběné lasery běžně pracují v režimu vysokotlakého řezání, tzn., že je vyžadován tlak dusíku na trysce od cca 7 bar až do 20 bar. Argon jako inertní plyn je poměrně drahý, takže se využívá výhradně pro řezání materiálů reagujících s O_2 a N_2 , jako je titan a jeho slitiny, kdy není možné z metalurgických důvodů použití kyslíku ani dusíku. /2/

Je známo, že podstatnou úlohu při řezání laserem sehraje rovněž čistota asistenčního plynu. Pro laserové řezání konstrukčních uhlíkových ocelí je vyžadován kyslík o čistotě 3,5 (99,95 %), přičemž běžně používaný tzv. technický kyslík má čistotu 2,5 (99,5 %). Vyšší čistota kyslíku přináší vyšší kvalitu řezu a možnost zvýšení řezné rychlosti. /2/

Závislost rychlosti řezání na čistotě kyslíku pro tloušťku materiálu 4 mm je znázorněna na obr. 2.2. Značení minimální čistoty plynu např. 3.5 znamená - číslo před tečkou (zde 3) udává počet devítek, číslo za tečkou poslední číslo v procentuelním označení čistoty plynu. Tj. údaj 3.5 označuje plyn s minimální čistotou 99,95 %.

Tlak kyslíku při výstupu z řezné dýzy je 5 barů pro tenké materiály o tloušťce 1–3 mm, pro tloušťky materiálu do 10 mm je tlak cca 1 bar a pro silnější materiály je zpravidla nastaven na hodnotu pod 1 bar. /14/

Tlak dusíku musí být nastaven na mnohem vyšších hodnotách než při řezání kyslíkem. Pro získání kvalitních řezných ploch bez otřepů na spodní řezné hraně, musí být tlak vyšší než 10 barů.



Při řezání dusíkem platí pravidlo: Čím je silnější materiál, tím musí být vyšší tlak na řezné dýze, např. při řezání 10 mm Cr-Ni oceli je nutno nastavit tlak dusíku v rozmezí 16-18 barů. Tlak řezného plynu se vždy měří na výstupu z řezné dýzy. V případě dusíku je optimální čistota 5,0 (99,9990 %). /2/

2.1.2 ŠÍŘENÍ LASEROVÉHO SVAZKU V ŘEZACÍM STROJI

Z rezonátoru – zdroje laserového záření – se svazek šíří optickou dráhou, tvořenou odraznými zrcadly. Existují dvě základní koncepce CO₂ laserů. První systém s pevnou optikou je založen na pohybujiícím se stole s řezaným materiálem, přičemž laserová hlava se pohybuje pouze ve svislé ose z. Tento způsob má velkou přednost v konstantní délce optické dráhy a stacionárních zrcadlech. Toto uspořádání napomáhá k zachování konstantního průměru svazku v průběhu celé technologické operace, což přispívá ke stálosti nastavených parametrů. Nevýhodou ale je nutnost pohybu obrobku, což při objemnějších dílech, a tudíž velkých setrvačných silách, extrémně zvyšuje nároky na zařízení. Laserové systémy pro řezání velkých tabulí plechu tento způsob uspořádání proto nevyužívají. Další variantou je tzv. mobilní optika, kdy je



tabule plechu stacionární a 3D pohyb zajišťuje laserová hlava. Toto řešení je využíváno některými i renomovanými výrobci laserových řezacích strojů. Nevýhodou je proměnlivá délka dráhy paprsku a pohyb odrazných zrcadel, v důsledku čehož lze často pozorovat různé parametry paprsku v různých místech pracovního prostoru laseru. Dobrým a v praxi také používaným kompromisem mezi oběma variantami je případ kombinace těchto možností, kdy pohyb plechu v jedné ose zajišťuje posuvný stůl, pohyb v dalších dvou osách je zajištěn řezací hlavou.

Hlavní význam výše popsaných způsobů zajištění relativního pohybu mezi řezací hlavou a tabulí plechu z hlediska kvality svazku spočívá ve snaze o udržení konstantního průměru svazku v celé ploše pracovního prostoru laseru. Průměr svazku D (obr. 2.3) je totiž jednou z rozhodujících veličin ovlivňujících vlastnosti svazku v ohnisku (průměr svazku, hloubka ostrosti atd.) a potažmo také výslednou rychlost řezání a kvalitu řezu. Zjednodušeně lze konstatovat, že jednotlivé veličiny se řídí následujícími vztahy:

$$d = \frac{4 \cdot M^2 \cdot \lambda \cdot F}{\pi \cdot D} \quad ; \quad z_f = \frac{d^2}{2 \cdot \lambda \cdot M^2}$$

(2.1), (2.2)

kde:

d je průměr svazku v ohnisku,

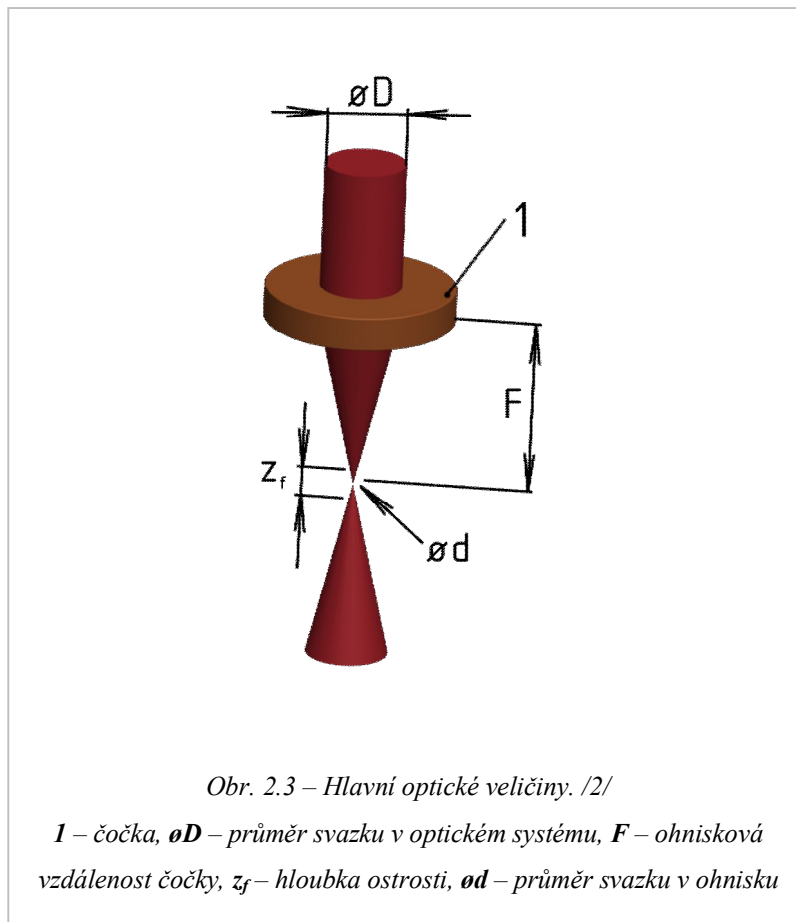
M^2 je faktor kvality svazku,

λ je vlnová délka záření,

F je ohnisková vzdálenost čočky,

D je průměr svazku v optickém systému,

z_f je hloubka ostrosti.



Obr. 2.3 – Hlavní optické veličiny. /2/

1 – čočka, $\varnothing D$ – průměr svazku v optickém systému, F – ohnisková vzdálenost čočky, z_f – hloubka ostrosti, $\varnothing d$ – průměr svazku v ohnisku

Délka optické dráhy – a především neměnnost délky – je významná s ohledem na kvalitu prostředí, v němž se svazek šíří.

Standardní způsob rozvedení svazku u CO₂ laserů je uvnitř trubic mezi odraznými zrcadly. Trubice slouží jako ochrana okolí před vlivem svazku, ale také jako ochrana svazku před negativními vlivy okolního prostředí. Vysokoenergetický svazek je udržován v konstantní formě (stálý průměr bez divergence) pouze za předpokladu, že není rozptylován odrazy od částic (prachové částice, mikrokapičky vody či olejů atd.) a šíří se v prostředí s konstantním indexem lomu (stálé a homogenní chemické složení, stálá teplota atd.).

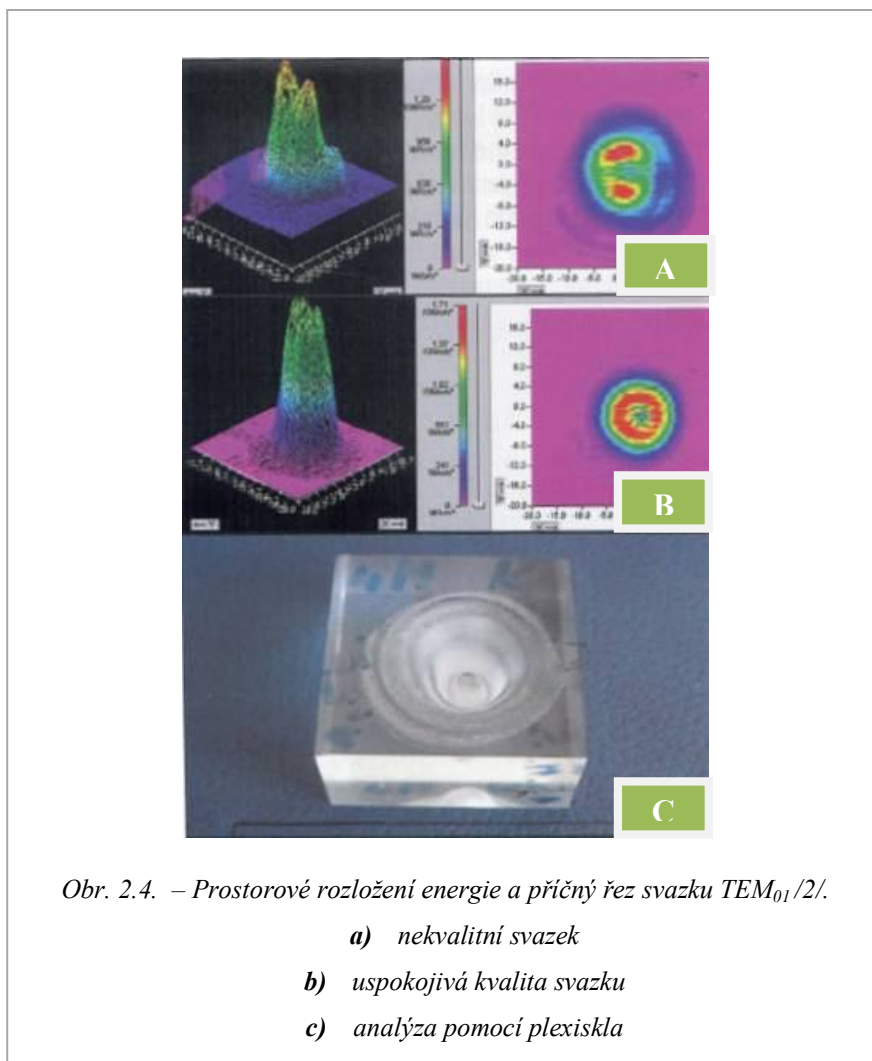
Takové prostředí je zajištěno ochrannou atmosférou, která je do trubic vháněna. Dodavatelé laserů doporučují pro svá zařízení různé způsoby řešení. Je známa varianta ochrany pomocí stlačeného vzduchu z kompresoru. Zde je třeba ovšem dokonalou filtrací separovat mechanické nečistoty, vlhkost, olejové zbytky a další nečistoty a zajistit pokud možno konstantní teplotu. Druhou možností je profukování optické dráhy dusíkem, což je nutností pro výkonnější lasery (cca nad 4 kW) a



kteřou je možné doporučit i pro nižší výkony, chceme-li úplně využít výkonové kapacity laseru. Díky čistému dusíku a vhodnému způsobu jeho vhánění do optické dráhy získáme kontrolu nad svazkem po celé délce optické dráhy. Dusík je obzvláště výhodný, je-li již k laseru dodáván ve velkém množství jako asistenční plyn. Dalším faktorem, který ovlivňuje svazek v optické dráze, je nastavení polohy a čistota odrazných zrcadel. Opět platí, že pohybující se zrcadla negativně ovlivňují kvalitu svazku (vzhledem k tolerancím pohybového systému). Poloha všech zrcadel musí zajistit souosý svazek po celé délce dráhy. Čistota zrcadel je v podstatě závislá na kvalitě prostředí, vyplňujícího optickou dráhu (viz výše). Jakákoliv nečistota, která na zrcadle ulpí, absorbuje část energie svazku, který na ni dopadá, a tím ovlivňuje celkové rozdělení energie ve svazku. Zároveň také díky této absorpci lokálně zvyšuje tepelné zatížení odrazného zrcadla a snižuje tak jeho životnost. Je tedy zapotřebí klást důraz na pravidelnou údržbu směrem k zajištění čistoty celé optické dráhy. /2/

Ve výše uvedených vztazích se vyskytuje veličina M^2 – faktor kvality svazku. Tato veličina je závislá na příčném rozdělení energie ve svazku, tzv. příčném elektromagnetickém modu (TEM). Příklady základních modů jsou na obr. 2.6. V praxi je ovšem na obrázku uvedených modů nemožné dosáhnout. Kvalitu svazku ovlivňuje, jak již bylo uvedeno, celá řada faktorů. Čím jednodušší modus je a čím více se ve skutečnosti blíží teoretickým předpokladům podle obr. 2.6 (méně negativních vlivů), tím vyššího využití energie svazku dosáhneme. Poklesne-li kvalita svazku pod určitou úroveň (zašpiněná či poškozená zrcadla, vyosený svazek, vada rezonátoru atd.), projeví se to zhoršenou kvalitou řezu, kterou lze kompenzovat snížením řezací rychlosti. Skutečnou kvalitu svazku je možné prověřit jednoduchou metodou – pomocí hranolu z plexiskla, který vložíme do nefokusovaného svazku a získáme tak obraz o kvalitě svazku. Způsob kontroly svazku pomocí hranolu z plexiskla je na obr. 2.4

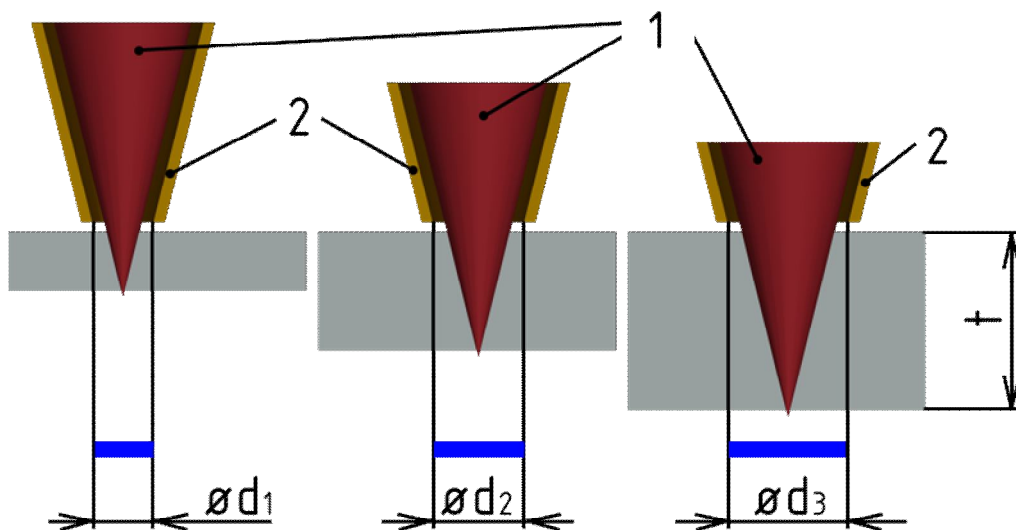
Dokonalejší obraz o prostorovém rozložení energie dá měření pomocí analyzátoru. /2/



Laserové řezací systémy využívají pro finální modulaci svazku transparentní optiku viz obr 2.3. Velmi významným prvkem v celém systému je tak výstupní čočka. Jejím úkolem je upravit svazek na výstupu laseru tak, aby jeho výsledné parametry umožnily zvládnout příslušnou operaci (koncentrace energie, hloubka ostrosti atd.). Používají se čočky různých tloušťek a průměrů, se dvěma základními ohniskovými vzdálenostmi 5 “ a 7,5 “. Ve většině případů se jedná o ZnSe čočky zajišťující velice nízkou absorpci průchozího záření. Čočky musí být vyrobeny z materiálů, které propouští infračervené záření. /2/

Čočky musí být z obdobných důvodů jako odrazná zrcadla udržovány v čistotě a v bezvadném stavu, jakékoliv větší znečištění má za následek trvalé poškození čočky a také postupné snížení kvality řezu a následnou ztrátu výkonu. Výměna čoček je běžnou záležitostí (např. při změně tloušťky řezaného materiálu). Po každé manipulaci musí být překontrolována souosost svazku s tryskou.

Pro řezání různých tloušťek materiálů jsou určeny různé průměry výstupních plynových trysek. Tryska má za úkol usměrnit proud asistenčního plynu do místa řezu (viz obr. 2.1). Průměr trysky se vždy volí co nejmenší s ohledem na laminární proudění asistenčního plynu a spotřebu plynu, vnitřní stěna otvoru ale nesmí omezovat procházející svazek. V praxi se průměry pohybují od 0,8 mm do 3 mm podle výrobce a typu laseru, přičemž čím větší je řezaná tloušťka, tím větší průměr otvoru potřebujeme. Roli hraje rovněž typ řezaného materiálu, neboť způsob zaostření svazku se podle materiálu liší. Např. při řezání vysokolegovaných ocelí se svazek zaostřuje na spodní hranu materiálu. Obr. 2.5 znázorňuje zvyšování průměru trysky v závislosti na rostoucí tloušťce materiálu. Nutností pro udržení dostatečné kinetické energie plynu a laminární proudění je zvyšování jeho tlaku. Vyšší tlak a větší průměr trysky znamenají podstatně vyšší spotřebu asistenčního plynu. Čím větší je průměr svazku v místě jeho dopadu na povrch materiálu při daném výkonu, tím menší hustotu energie v dopadové ploše získáme. Poklesne-li hustota energie pod kritickou hodnotu, nedojde k řezu. Tímto způsobem je pro daný laser omezena maximální řezatelná tloušťka konkrétního materiálu. /2/



Obr. 2.5 – Změna průměru trysky v závislosti na tloušťce materiálu. /2/



2.1.3 PŘÍČNÝ PROFIL SVAZKU

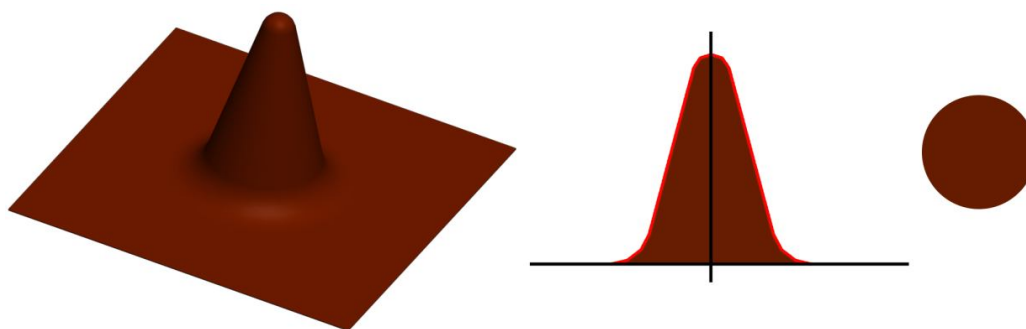
Pro charakteristiku vlastností laserů je důležitý tzv. příčný profil svazku (zkráceně řečeno tvar průřezu laserového svazku). Tvar průřezu svazku záření vystupujícího z optického rezonátoru je závislý na vlnové délce fotonů, na souososti, vzdálenosti a zakřivení zrcadla a na průřezu laserové trubice u (CO₂ laserů výbojové trubice). Tvar průřezu svazku neboli mód je označován TEM. /1/

Teoreticky může být vytvořeno nekonečné množství módů, ale jen některé mají praktické průmyslové uplatnění. V příčném průřezu paprsek vytváří buď jen jednoduchou stopu - základní mód - anebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické. Je to dáno skutečností, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci - mód - v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru. /17/

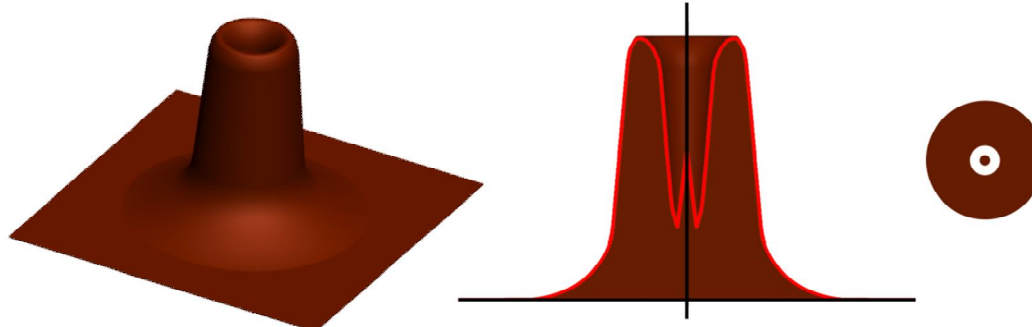
Módová struktura obecně udává rozložení energie na průřezu laserového paprsku. V teorii elektromagnetického pole jsou módy (příčné elektromagnetické vlny, jejichž vektory leží v rovině kolmé na směr šíření) označovány symbolem TEM_{m,n} (Transverse Excitation Mode), kde index *m* udává počet uzlů pole v příčném směru ve směru osy x, index *n* udává počet uzlů ve směru osy y.

Pro laserové řezání je nejvýhodnější módová struktura TEM₀₀ (obr. 2.6) tj. rozložení energie podle Gaussovy křivky. Zde také dostáváme úzkou řeznou spáru, rovnou řeznou plochu a úzkou tepelně ovlivněnou oblast a můžeme pracovat s laserem s nižším výkonem. Laserový paprsek s tímto režimem má nejmenší divergenci. /3/

U formy režimu TEM₀₁, který se označuje také jako kruhový režim, je na ose záření nulové místo intenzity, směrem ven nejprve intenzita dosahuje maxima a poté klesá. Forma režimu TEM₀₁ se používá při řezání nebo také při vrtání v případech, ve kterých se používají lasery o výkonu nad 3000 W a zrcadlové optiky. Režim TEM₀₁ je znázorněn na obr. 2.7.



Obr. 2.6 - Rozdělení intenzity základního režimu $TEM_{00}/1/$.



Obr. 2.7 - Rozdělení intenzity kruhového režimu $TEM_{01}/1/$.

2.2 TECHNOLOGICKÉ HODNOCENÍ ŘEZÁNÍ LASEROVÝM PAPRSKEM

Řezání CO_2 laserem je nízkoodpadový technologický proces. Z hlediska efektivnosti tohoto procesu je důležité stanovit optimální podmínky jeho průběhu a zhodnotit jeho kvalitu dle následujících ukazatelů:

- šířka řezu (řezná spára),
- velikost tepelně ovlivněné oblasti,
- drsnost povrchu řezu a případné další charakteristiky. /3/



2.2.1 ŠÍŘKA ŘEZU

Šířka řezu představuje nejzávažnější kritérium stejně jako u klasických metod obrábění. Čím je větší, tím větší je množství odpadu a menší přesnost. /3/

Při řezání laserem vzniká řezná spára, která se zpravidla od horní hrany řezu k dolní hraně řezu zužuje. Řezná spára se udává v milimetrech. /1/

2.2.2 TEPELNĚ OVLIVNĚNÁ OBLAST

U uhlíkové oceli se hloubka tepelně ovlivněné oblasti zmenšuje s roustoucí rychlostí řezání, prakticky nezávisí na tloušťce oceli. Proto není na vzorcích menší tloušťky velikost tepelně ovlivněné oblasti menší, než na vzorcích větších tloušťek. Velikost tepelně ovlivněné oblasti je závislá i na tlaku kyslíku. Se vzrůstem tlaku se projevuje tendence ke zmenšování rozměru tepelně ovlivněné oblasti při jakékoli rychlosti. Ale obvykle se při malých rychlostech řezání (např. $v = 500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) tato tendence projevuje silněji. Při vysokých rychlostech jsou rozměry tepelně ovlivněné oblasti daleko stabilnější a skoro nezávislé na tlaku plynu. Se vzrůstajícím výkonem záření se zvětšují i rozměry tepelně ovlivněné oblasti. /3/

V experimentální části je sledována velikost tepelně ovlivněné oblasti v závislosti na rychlosti řezání laserem. Neboť rychlost řezání ovlivňuje velikost tepelně ovlivněné oblasti. Vzorky byly voleny v tloušťkách od 1,5 mm do 2 mm. Porovnávány jsou vzorky různých jakostí, a to uhlíkové, vysokopevnostní a speciální TWIP oceli. TWIP oceli byly zvoleny s ohledem na skutečnost, že se jedná o poměrně novou materiálovou skupinu, kde není dosud známo chování za různých podmínek. Především negativní zkušenosti ohledně vlivu teplotního zatížení na tento materiál, které může vést ke zhoršení vlastností TWIP materiálu.

Dalším důvodem změny rychlosti řezání je samozřejmě ekonomické hledisko. Neboť často se firmy setkávají s tím, že je řečeno čím pomaleji se bude díl řezat, tím je kvalitnější. Což je problémem pro odběratele, který klade důraz na finanční stránku zakázky. Samozřejmě je řešena i na druhá strana pohledu, kterou je vyšší rychlost řezání v porovnání s optimální hodnotou řezání k danému materiálu.

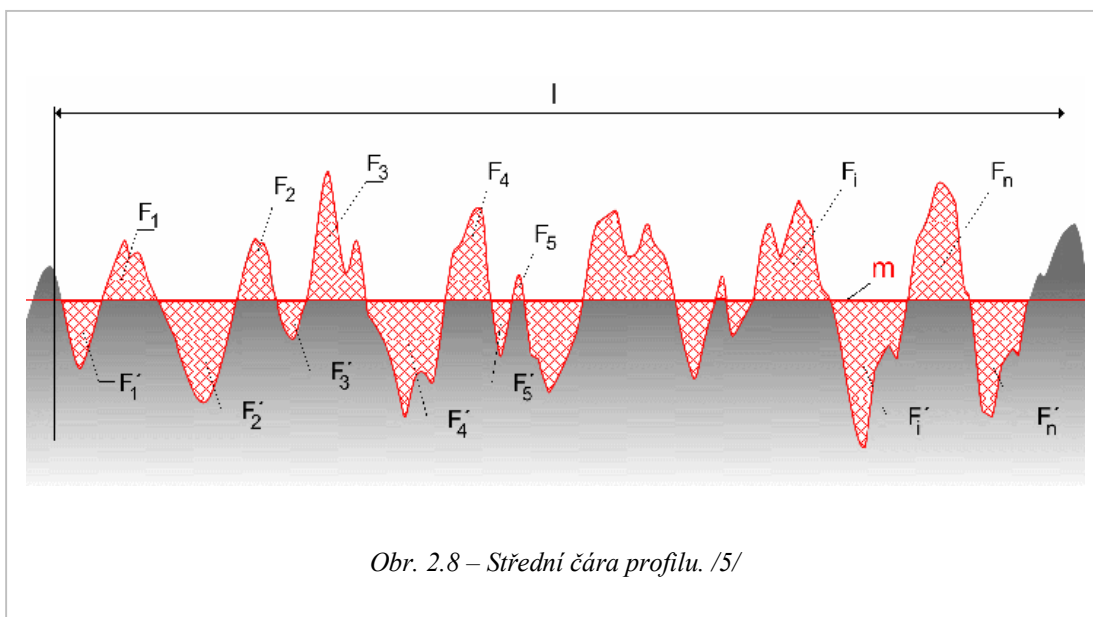
Z praktického hlediska je důležité určit, jestli rychlost řezání a tepelně ovlivněná oblast mají vliv na mechanické a kvalitativní vlastnosti výpalku. To jsou základní kritéria, která jsou pro zpracování materiálů důležitá.

2.2.3 DRSNOST POVRCHU

Drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Podle převládajícího směru nerovností se drsnost posuzuje v příčném nebo podélném směru. Drsnost je definovaná v ČSN EN ISO 4287.

Základní parametry drsnosti:

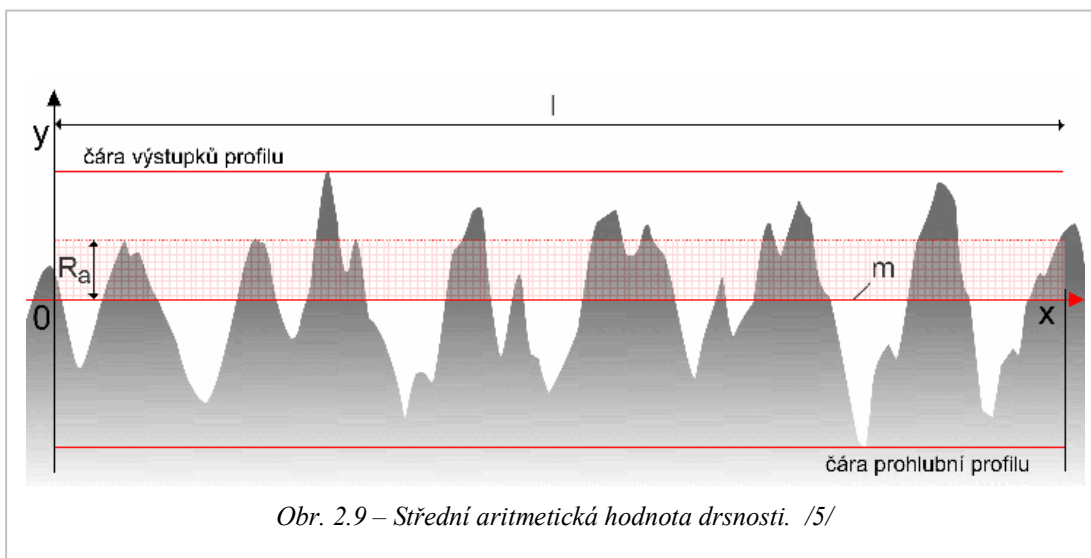
- 1) **m** - střední čára profilu (obr. 2.8) - má tvar geometrického povrchu (tj. přímky, kružnice, evolventy apod.), je paralelní s hlavním směrem profilu a rozděluje zjištěný povrch tak, že v rozsahu základní délky je součet čtverců úchylek tohoto profilu od střední čáry **m** minimální. Na grafickém záznamu povrchu profilu se střední čára prokládá tak, aby součty ploch po obou jejích stranách byly v rozsahu základní délky stejné. /6/



- 2) **R_a** - střední aritmetická hodnota drsnosti (viz obr. 2.9):

$$R_a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |y_i|$$

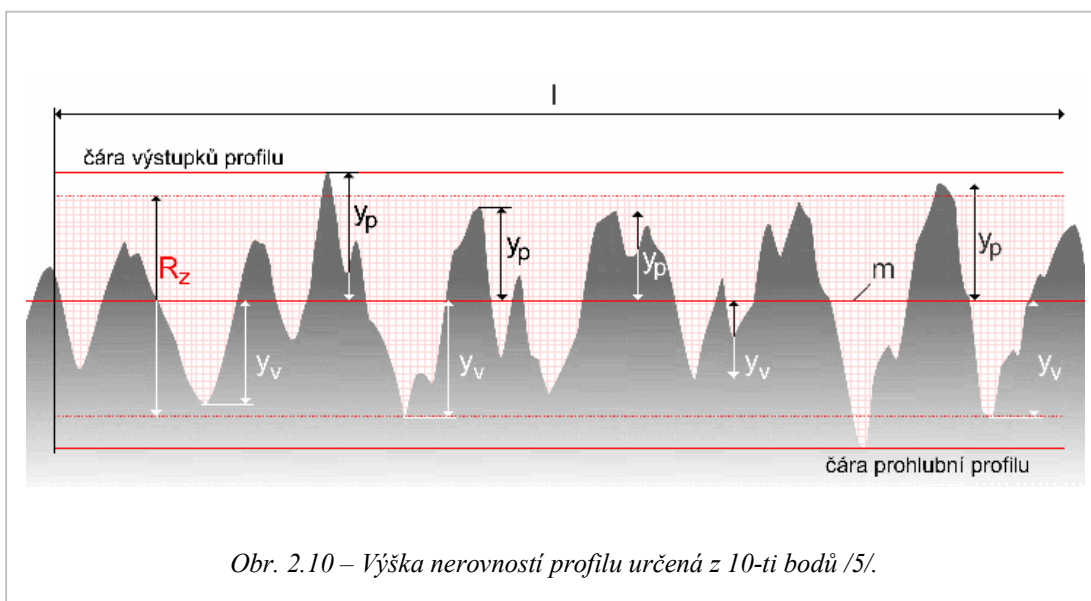
(2.3)



3) R_z - výška nerovností profilu určená z 10-ti bodů (obr. 2.10):

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{p \max}| + \sum_{i=1}^5 |y_{v \max}|}{5}$$

(2.4)

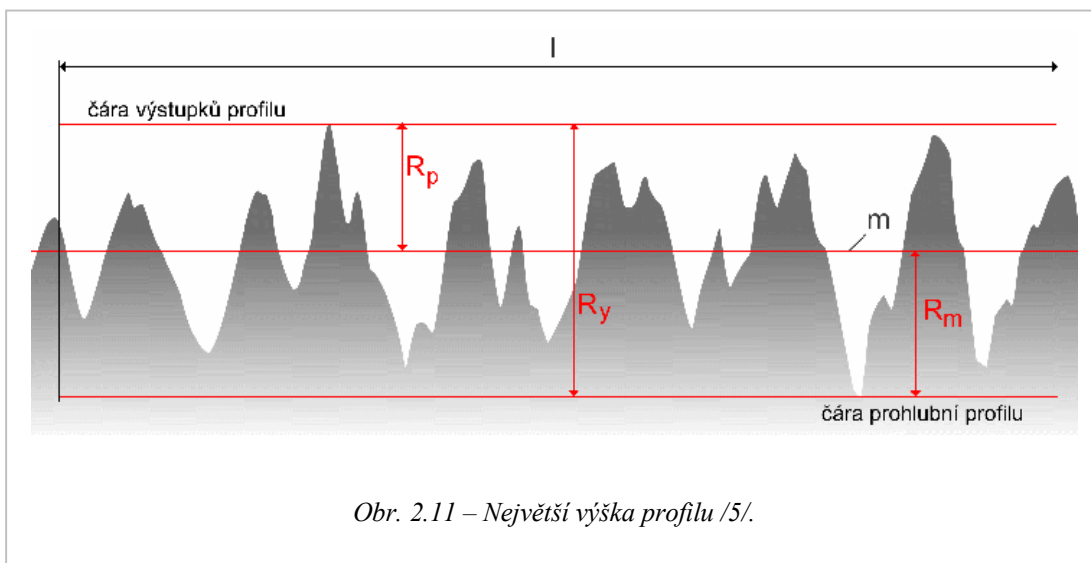


4) R_y – největší výška profilu (obr. 2.11):

$$R_y = R_p + R_m \quad (2.5)$$

kde: R_p - největší výška výstupků profilu

R_m - největší hloubka prohlubní profilu



Obr. 2.11 – Největší výška profilu /5/.

Dalšími charakteristikami řezu jsou např. vnější vzhled řezu, jeho příčný řez, množství vytvořeného otřepu a jeho rozvrstvení, stejnorodost řezu a další. /3/ Tato kritéria jsou popsána v normě DIN EN ISO 9013:2000.

2.2.3.1 DRSNOST POVRCHU PŘI ŘEZÁNÍ LASEREM

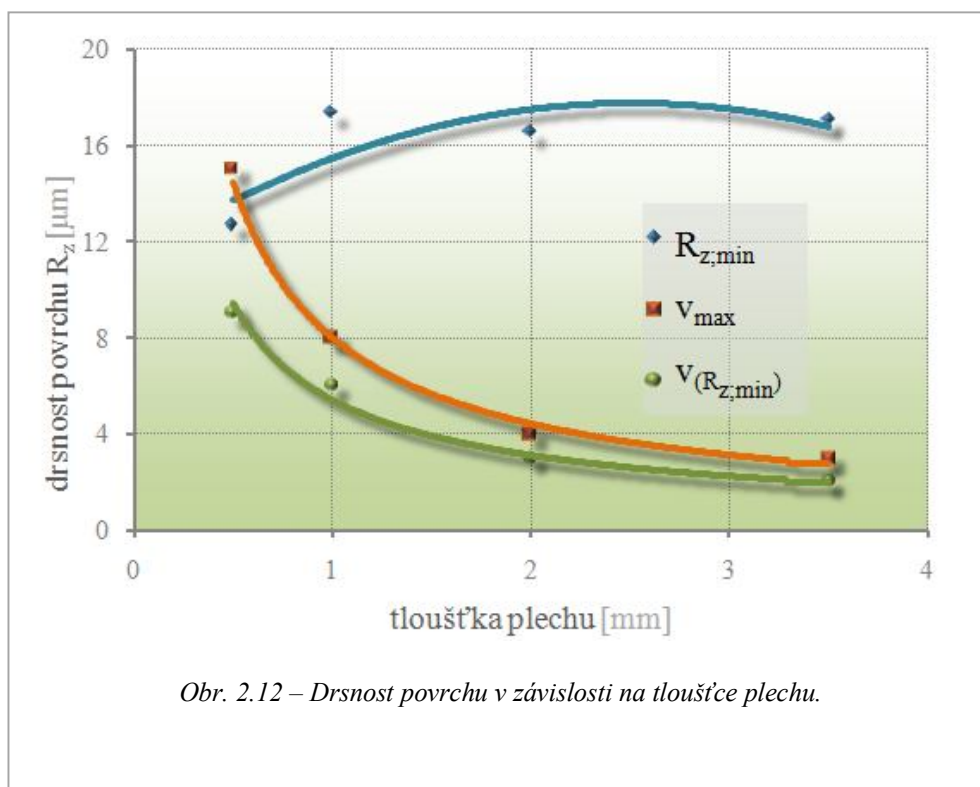
Podélná drsnost povrchu je velmi důležitá při odhadu kvality řezu. Hodnota drsnosti odráží vliv podmínek při opracování. Drsnost povrchu a rozměry tepelně ovlivněné oblasti jsou důležité parametry pro stanovení tloušťky materiálu, která se musí dále odstranit při další úpravě povrchu.

Drsnost povrchu řezné plochy výpalku se mění se vzdáleností od lící plochy materiálu plechu. Na drsnost povrchu řezu má vliv rychlost řezu. Existuje také její optimální hodnota, při které je R_a nejmenší. Při větších tloušťkách oceli je drsnost nestejnorodá. Drsnost se mění v závislosti na hloubce řezu.

V oblasti řezu, v blízkosti vstupu paprsku do materiálu je R_z minimální. Ve střední části povrchu řezu je hodnota R_z vyšší a vzrůstá více v té části povrchu řezu,

kde laserový paprsek vychází z materiálu. Se změnou rychlostí se mění i drsnost ve všech třech úsecích povrchu řezu. Hodnota R_z na vstupu paprsku do materiálu se pohybuje cca 10 μm . /3/

Závislosti mezi různými rychlostmi řezání pro různé tloušťky materiálů jsou zobrazeny na obr. 2.12. Maximální rychlost řezání v_{max} je zde definována jako největší rychlost, kdy ještě dojde k oddělení materiálu bez ohledu na kvalitu řezu. Druhá rychlost v diagramu $v_{(R_z, \text{min})}$ je rychlost řezání, při níž bylo dosaženo nejmenší drsnosti povrchu řezné hrany. S rostoucí tloušťkou plechu klesá řezná rychlost. /15/



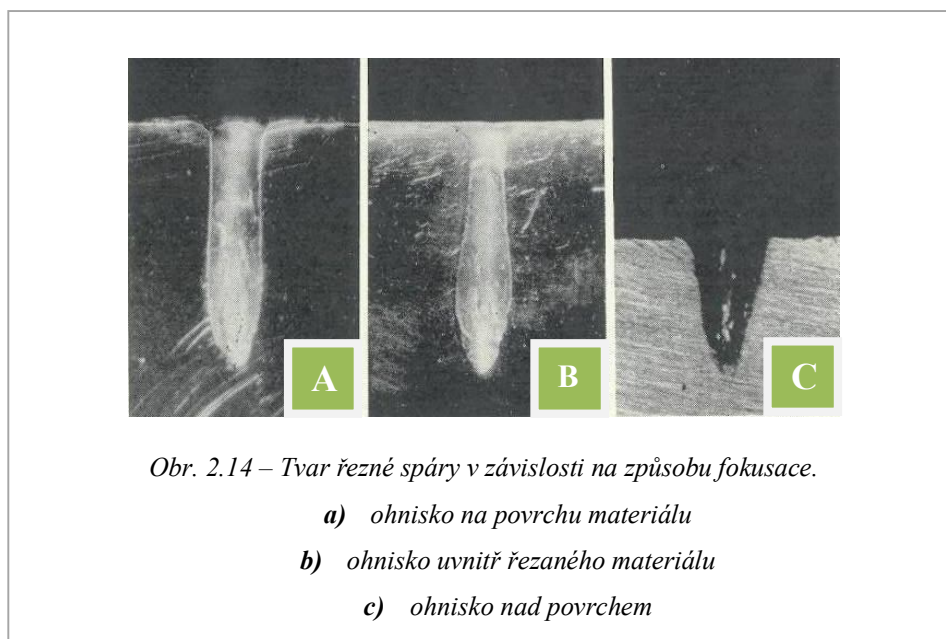
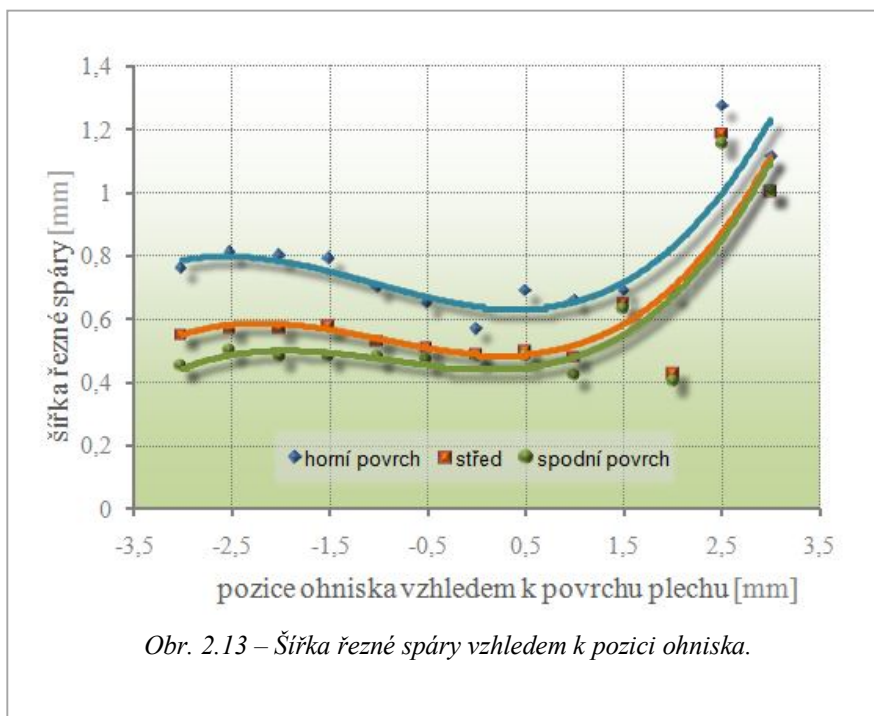
Obr. 2.12 – Drsnost povrchu v závislosti na tloušťce plechu.

2.2.4 FOKUSACE

Závislost reálné šířky řezu v závislosti na pozici ohniska znázorňuje obr. 2. 13 a to na straně vstupu paprsku, na straně výstupu paprsku a ve středu řezané tloušťky. Šířka řezu na straně vstupu paprsku je výrazně širší. Pokud je ohnisko paprsku umístěno na povrchu řezaného vzorku, jsou rozdíly mezi šířkou spáry minimální. Teoretické šířky spáry je dosahováno pouze na výstupní straně paprsku. Spára má V tvar. Tento tvar není významně ovlivněn pozicí ohniska. Pouze pro ohniska relativně vysoko nad povrchem vzorku je jasný růst šířky spáry a tendence k paralelizaci stěn paprsku. /15/

V praxi při řezání nelegované oceli laserovým paprskem je ohnisko položeno do horní třetiny tloušťky plechu. Naproti tomu u vysoce legované oceli - zde se jedná o proces tavného řezání – je fokusováno pod spodní hranu plechu. Také hliník je řezán vysokotlakým tavným řezáním, přičemž ohnisko je většinou fokusováno do spodní třetiny tloušťky plechu. /15/

Rozdíly tvaru řezné spáry v závislosti na způsobu fokusace jsou znázorněny na obr. 2.14.





2.3 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

Jedná se o nejčastěji používanou a také nejdůležitější zkoušku pro zjištění základních mechanických hodnot daného materiálu. Je zkouškou základní a je tedy předepsána normou ČSN EN 10002-1. /11/

Podle této normy mohou být zkušební tyče tzv. poměrné nebo nepoměrné. Poměrné vzorky jsou takové, kde se počáteční měřená délka L_0 vztahuje k počáteční ploše příčného průřezu zkušební vzorku S_0 . Nepoměrné vzorky nemají počáteční měřenou délku L_0 vázanou na počáteční průřez tyče S_0 , který je v případě plechů obdélníkový. V praxi se používají délky 50, 80, 100 a 120 mm. Není však možné je volit libovolně, jelikož jejich volba závisí na samotných rozměrech testovaných vzorků. /11/

Důvodem použití statické zkoušky tahem v experimentální části bylo zjistit, zdali rychlost řezání laserem má vliv na mechanické vlastnosti materiálů. Při řezání laserem dochází jednak ke vzniku tepelně ovlivněné oblasti a ke vzniku žlábků na povrchu materiálu. Při statické zkoušce tahem dle normy musí být vzorky podle předpisů obrobené. Vzorky použité v experimentální části této práce byly přímo vyříznuty na laseru a bez dalších úprav zkoušeny.

Dle předpokladů z kap. 2.2.2, kde bylo popsáno, že tloušťka materiálu nemá vliv na tepelně ovlivněnou oblast¹, nepřináší použití dvou různých tloušťek 1,5 mm a 2 mm (detailní popis viz kap. 3.2) komplikace z hlediska vyhodnocení naměřených výsledků.

2.4 MIKROTVRDOST

Na měření tvrdosti velmi malých předmětů a tenkých vrstev, tak i v metalografii na identifikaci jednotlivých strukturních složek se používá metoda měření mikrotvrdosti. Princip měření je shodný s Vickersovou metodou, ale s mnohem menším zatížením. Mikrotvrdoměr je samostatný přístroj vybavený mikroskopem, nebo tvoří součást optického mikroskopu.

Při měření mikrotvrdosti struktury může při jednotlivých zrnech jedné fáze vzniknout poměrně velký rozptyl tvrdosti. Je to možné vysvětlit různou krystalografickou orientací a nerovnoměrnou velikostí měřených zrn.

¹ Toto je navíc potvrzeno v experimentální části práce.



Hodnota mikrotvrdosti závisí na velikosti použitého zatížení, kvalitě povrchu, přesnosti odečítání, rozměrech vtlačovaného tělesa apod. Hodnoty mikrotvrdosti nejsou proto porovnatelné s hodnotami makrotvrdosti měřenými při větším zatížení. Zkouška mikrotvrdosti je normalizovaná dle ČSN 42 0375.

Podle této normy se při měření mikrotvrdosti používá zatížení od $9,8 \cdot 10^{-3}$ N do $49 \cdot 10^{-1}$ N odstupňované v deseti stupních. Mikrotvrdost se smluvně označuje značkou HV, doplněnou velikostí a časem zatížení, stejně jako při měření Vickersové makrotvrdosti. Zvětšení mikroskopu mikrotvrdoměru musí být podle velikosti zkušebního tělesa 200 až 400- násobné. Volba zatížení při měření mikrotvrdosti závisí na tloušťce a tvrdosti zkoušeného předmětu. /7/

Vyhodnocování mikrotvrdosti bylo zvoleno jako indikátor tepelně ovlivněné zóny při řezání laserem. Na mikrotvrdosti lze vyhodnotit oduhličení, zakalení či popuštění vrstvy. Mikrotvrdost bude hodnocena v závislosti na hloubce od místa řezu. Měření tak umožní vyhodnocení hloubky tepelně ovlivněné oblasti.

2.5 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ POUŽITÝCH PRO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro experimentální část diplomové práce byla použita ocel DC01A, která patří mezi klasické materiály. Další sledované materiály jsou vysokopevnostní materiály s obchodním názvem DOCOL 1200M a BTR 165. Ocel BTR 165 byla použita dvojího druhu. Prvním druhem byla BTR 165, která byla pouze žíhaná a druhým typem byla ocel BTR 165 termomechanicky zpracovaná. Posledním zvoleným materiálem, který vykazuje vysokou pevnost a tažnost okolo 60%, je materiál označovaný jako TWIP ocel.

2.5.1 MATERIÁL TWIP

Materiál označovaný jako TWIP (Twinning Induced Plasticity) je jednou z novinek, která vyplývá z požadavků zpracovatelů plechů na materiály o vysokých hodnotách pevnosti a tažnosti. Takovéto materiály obsahují prvky stabilizující austenit (převážně Mn nebo méně často Ni) a vykazují velmi nízkou energii vrstevné chyby (SFE – Stacking Fault Energy) za pokojové teploty. V důsledku této skutečnosti nastává v materiálu mechanické dvojčatění spolu se zvyšující se deformací, které probíhá zároveň s deformací skluzem. Dochází k tzv. TWIP efektu – plasticita indukovaná dvojčatěním. /8/

Značný zájem zpracovatelů plechů (převážně v automobilovém průmyslu) o snížení energie vrstevné chyby materiálu spočívá ve schopnosti takovýchto materiálů dosahovat výborné tažnosti (A_x), vysokých pevnostních hodnot ($R_{p0,2}$ a R_m) a exponentu deformačního zpevnění n . Neobvykle vysoké hodnoty tažnosti v kombinaci s mechanickými hodnotami jsou tedy zajištěny silným dvojčatěním v austenitické matici během deformace. Je zřejmé, že vysoká tažnost spolu s vysokou pevností těchto nově vyvinutých (a stále spíše vyvíjených) TWIP ocelí legovaných Mn může poměrně výrazně zlepšit odolnost karoserie automobilu během crash testů. Při výrobě materiálu vykazujícího TWIP efekt se samozřejmě berou v úvahu legující prvky ovlivňující především proces stabilizace austenitu a snižování SFE (SFE – Stacking Fault Energy). Nejdůležitějším z nich je Mn, používají se však také jiné prvky. /9/

Tab. 2.1 - Hlavní legující a přísadové prvky s ohledem na TWIP efekt /9/

značka prvku	hlavní charakteristika legování s ohledem na TWIP efekt
Mn	Rozhodující prvek při stabilizaci austenitu. Jeho podíl ve struktuře určuje také velikost SFE.
C	Stabilizuje austenit zvyšováním energie vrstevné chyby (SFE), zabraňuje vytvoření ε -martenzitu.
Si	Zjemňuje ε -martenzit, ačkoliv nedochází ke zlepšení tažnosti.
Al	Zvyšuje SFE a potlačuje vznik ε -martenzitu. Dochází také ke zlepšení tvárnosti za nižších teplot.
B, Ti, Zr	Zlepšují tvárnost za vyšších teplot.
N	Velmi efektivní zpevňující element v austenitu a dochází také k redukci objemového podílu ε -martenzitu

Pro TWIP oceli představuje hodnota meze pevnosti R_m oblast zhruba kolem 1200 MPa. S takovou hodnotou se mohou srovnávat pouze vysokopevnostní martenzitické oceli. Velikost tažnosti srovnávaných materiálů je pak pro TWIP oceli nezvykle vysoká a to zejména s ohledem na pevnostní hodnoty tohoto materiálu. Ostatní vysokopevnostní materiály mají tažnost A_{80} zhruba v intervalu 5 % ÷ 15 %, materiál TWIP 1200 dosahuje hodnot přes 60%. Lze tedy opět zdůraznit velmi dobrou kombinaci pevnostních hodnot a tažnosti pro TWIP oceli a také značně



širokou možností nabídky velikostí hodnot a kombinací těchto mechanických charakteristik materiálů od samotných výrobců plechů. Jedná se tedy o zcela výjimečný materiál s možnou širokou škálou sortimentu. /10/

2.5.1.1 POUŽITÍ MATERIÁLU TWIP 1200

Budoucí širší uplatnění těchto plechů se však odvíjí z hlubšího poznání jejich chování. V současné době již existují automobilky, které v počátečních stádiích návrhu karoserie v předseriové výrobě vyzkoušely tento materiál. Výsledky tohoto testování jsou však předmětem utajení znalostí a poznání těchto automobilek. Přesto lze z určitých náznaků a jednotlivých jednání vypožorovat jisté zklamání ohledně budoucího širšího nasazení tohoto materiálu do výroby. Jedná se patrně především o negativní zkušenost ohledně vlivu teplotního zatížení na tento materiál, která může vést ke změně vlastností TWIP materiálu a následným velmi špatným výsledkům při crash testech. /10/

2.5.1.2 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU TWIP 1200

Ocel TWIP vykazuje jak vysoké hodnoty pevnosti, tak velkou tažnost. Tato skutečnost je dána především díky mimořádně velkému exponentu deformačního zpevnění. Předpokládá se, že vznik dvojčete zvyšuje hodnotu zpevnění materiálu díky svému působení na pohyb dislokací. Dvojče totiž působí jako velmi silná překážka (stejná jako např. hranice zrn) vůči tomuto pohybu. Vznikem dvojčat dochází ke snižování volné dráhy pohybu dislokací. Toto výrazné zpevnění materiálu následně umožňuje docílit protváření velkého objemu materiálu před vytvořením krčku. Tento zpevňující efekt díky mechanickému dvojčatění bývá v literatuře označován jako plasticita indukovaná dvojčatěním (**T**Winning **I**nduced **P**lasticity – **TWIP**). /10/

2.5.2 MATERIÁL DOCOL 1200M

Materiál Docol 1200 stupně M je podeutektoidní manganová ocel vyráběná válcováním za studena s použitím speciálního tepelného zpracování na kontinuální žíhací lince. Jeho vysoká pevnost je vytvořena extrémně rychlým vodním ochlazením z vysoké austenitické teploty. Tento pevnostní materiál je charakterizován poměrně dobrou tvárností při extrémně vysoké hodnotě pevnosti a dobrou svařitelností danou smíšenou feriticko-martenzitickou strukturou. Lze použít



všechny běžné metody svařování s přihlédnutím k chemickému složení této oceli.
/12/

2.5.2.1 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU DOCOL 1200M

Typické aplikace DOCOLU 1200M jsou např.: bezpečnostní prvky v automobilech, výztuhy nárazníku, kotoučové spojky a další.

Materiál je dodáván v tloušťkách od 0,5 mm do 2,10 mm. Šířka dodávaných plechů je v rozmezí od 800 mm do 1500 mm, v závislosti na kvalitě oceli a tloušťce. Materiál Docol 1200 M je dodáván v tolerancích dle evropské normy EN 10 131.

Docol 1200M je určen pro konvenční technologie tváření za studena, jako je například lisování, válcování, kontinuální ohýbání nebo výroba trubek. Ohýbatelnost tohoto materiálu je dobrá, přesnost poloměru ohybu bude větší, pokud bude materiál ohýbán příčně na směr válcování. Zde je totiž ohýbatelnost o něco lepší než ve směru podélném. Při stříhání a děrování tohoto materiálu, je zvláště zajímavé použití přesného stříhání. Ovlivňujícími faktory jsou tloušťka plechu, pevnost a požadavek na kvalitu střížné plochy. Je zaručena kvalitní střížná plocha při použití střížné mezery 10 % - 12 % z tloušťky plechu. Svařitelnost je velmi dobrá, neboť materiál Docol má velmi nízký obsah legujících prvků současně s vysokou pevností. Docol lze svařovat všemi běžnými metodami, jako je svařování elektrickým obloukem v plynné atmosféře, svařování metodou TIG, svařování plasmou, laserem nebo odporové bodové svařování /12/.

2.5.3 MATERIÁL BTR 165

Materiál BTR 165 se řadí mezi tzv. DP oceli (Dual Phase - dvoufázové oceli). Základem těchto ocelí je přítomnost měkké fáze, která ve své podstatě zaručuje určitou míru tažnosti a také tvrdé složky, která poskytuje výsledné vysoké hodnoty pevnostních charakteristik. V tomto případě se jedná o ocel s nízkým obsahem C na bázi Mn - Si se strukturou tvořenou měkkou feritickou maticí, ve které se nacházejí malé oblasti tvrdého martenzitu, které mohou obsahovat určitý podíl zbytkového austenitu. Dobrá tvářitelnost je tedy zaručena feritickou maticí, zatímco výsledná pevnost (500 ÷ 600) MPa je dána ostrůvky martenzitu. /10/

Ocel BTR 165 je určena pro následné termomechanické zpracování přímo v tvářecím procesu (ohřátý polotovár na přibližně 950°C je vložen do nástroje a je provedena tvářecí operace se současným chlazením). Tímto postupem označovaným

jako termomechanické zpracování je docíleno maximálního využití materiálového potenciálu. Pokud se jedná o tváření za tepla, je vylisovaný díl ve výsledku deformačně nezpevněný a výsledná pevnost v tahu po termomechanickém zpracování je v rozmezí 1500 MPa až 1800 MPa (pevnost před zpracováním je cca 500 MPa). Změna mechanických vlastností v závislosti na tepelném zpracování je v příloze 2. Mimořádně vysoké mechanické hodnoty jsou dány opět smíšenou feriticko - martenzitickou strukturou materiálu a předurčují ho k aplikacím, kde jsou kladeny extrémní nároky na pevnost dílů.

Tepelná vodivost, která úzce souvisí s rychlostí odvodu tepla při termickém dělení souvisí s mechanickými hodnotami, kde obecně platí, že se zvyšující se pevností roste i elektrický odpor (klesá elektrická i tepelná vodivost materiálu). Z výše řečeného vyplývá, že materiál BTR 165 bude mít díky vyšším mechanickým hodnotám nižší tepelnou vodivost a tepelně ovlivněná oblast bude tedy menší než u materiálu DOCOL 1200 M. /13/

2.5.4 MATERIÁL DC01A

Ocel DC01A je materiál 1.0330 dle EN 10130.

Jedná se o nelegovanou jakostní ocel, vhodnou pro tváření za studena, k nanášení povlaků žárovým pokovováním, elektrolyticky a k nanášení organických a jiných povlaků. Vhodná ke svařování běžnými postupy.

Výroba probíhá válcováním za studena. Tloušťky plechů od 0,35 do 3 mm.

2.6 CHEMICKÉ SLOŽENÍ A MECH. VLASTNOSTI OCELÍ POUŽITÝCH PRO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části byly použity materiály, které byly popsány v kapitole 2.5. Chemické a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Chemické složení ocelí dle materiálových listů je uvedeno v tab. 2.2

Tab. 2.2 - Chemické složení ocelí použitých v experimentální části

materiál	chemické složení [%]									
ocel DC01A	C \approx 0,05	Mn \approx 0,35	Si \approx 0,01	P \approx 0,010	S \approx 0,011					
Docol 1200M	C \approx 0,1	Si \approx 0,2	Mn \approx 1,60	P \approx 0,015	S \approx 0,002	Al \approx 0,04	Nb \approx 0,015			
BTR 165	C \approx 0,26	Si \approx 0,23	Mn \approx 1,34	Cr \approx 0,2	B \approx 0,003	Al \approx 0,04	Ti \approx 0,05			
TWIP 1200	C \approx 0,62	Si \approx 0,19	Mn \approx 19	P \approx 0,022	S \approx 0,018	Cr \approx 0,34	Mo \approx 0,04	Ni \approx 0,06	V \approx 0,3	W \approx 0,18

Mechanické vlastnosti ocelí udávané v materiálových listech jsou v tab. 2.3

Tab. 2.3 - Mechanické vlastnosti ocelí použitých v experimentální části

materiál	R_m [Mpa]	$R_{p0,2}$ [Mpa]	tažnost
Docol 1200M	1200 - 1400	950 - 1200	$A_{80} =$ min. 4%
BTR 165 kalení do vody, žháno 630°C	1000 - 1300	min. 900	$A_{50} =$ min. 10%
BTR 165 žháno	520 - 640	320	$A_{50} =$ min. 20%
TWIP 1200	1200	500 - 600	$A_{50} = 60\%$
ocel DC01A	300	280	$A = 28\%$

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 VOLBA MATERIÁLŮ

Pro experimentální část bylo použito následujících materiálů ve formě plechů: DC01A, Docol 1200M, BTR 165 tloušťky 2 mm a plech TWIP 1200 tloušťky 1, 5 mm. Ocel BTR 165 byla dvojího druhu. Prvním druhem byla BTR 165, která byla pouze žháná a druhým typem byla ocel BTR 165 termomechanicky zpracovaná. Volba materiálu se odvíjela od záměru porovnávat 3 druhy ocelí. Jednak obyčejnou uhlíkovou ocel, dvě vysokopevnostní oceli a speciální ocel TWIP 1200.

3.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Pro vzorky byl nejprve připraven nářezový plán, který byl následně vložen do NC programu určeného pro laser. Základní parametry nastavení jsou napsány v kap. 3.3.1. Tyto parametry byly voleny s ohledem na druh materiálu a jeho tloušťku.

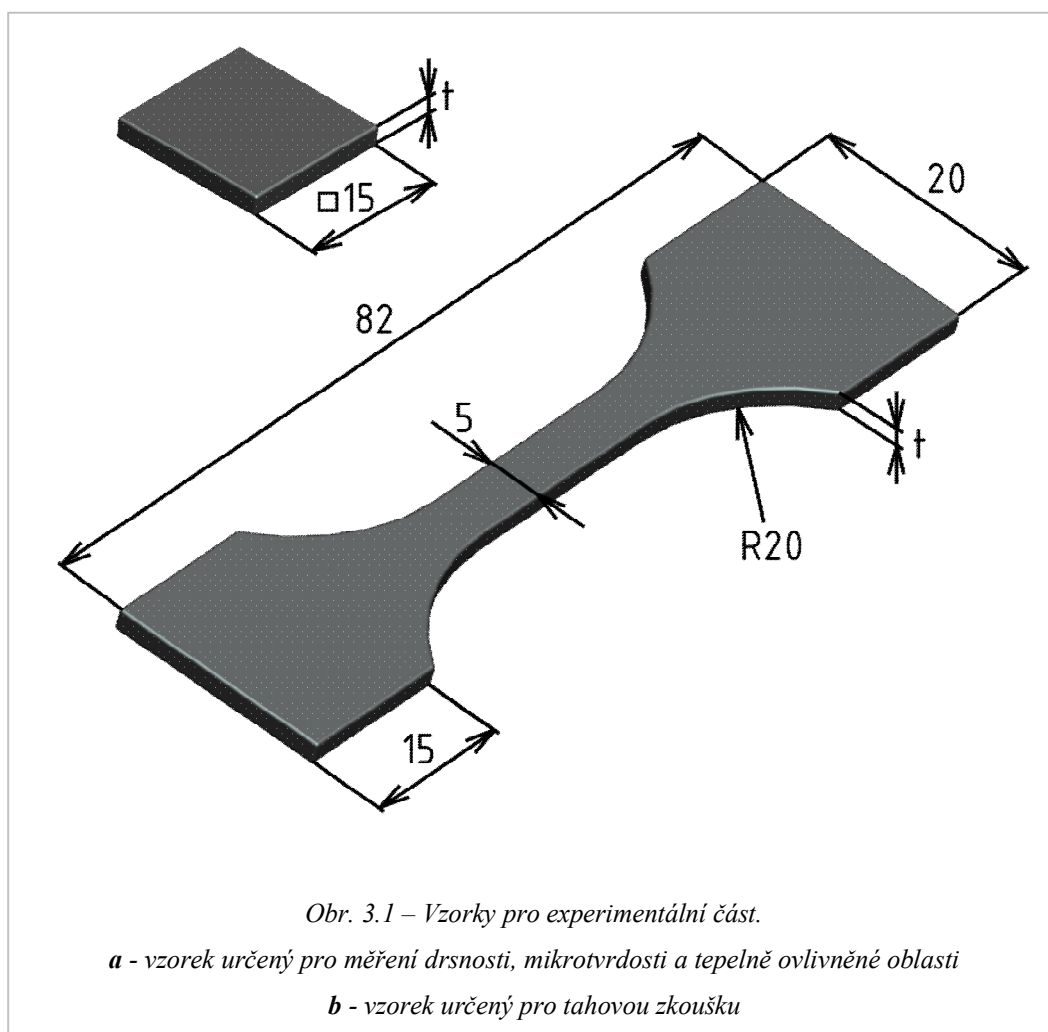
Vzorky byly zvoleny dvěma způsoby s ohledem na způsob dalšího vyhodnocování:

- ***Vzorky určené pro měření drsnosti, tvrdosti a tepelně ovlivněné oblasti***

Rozměry vzorků pro měření drsnosti, mikrotvrdosti a tepelně ovlivněné oblasti byly zvoleny v závislosti na parametrech, které byly vhodné k provedení výše zmíněných zkoušek. Rozměry těchto vzorků jsou uvedeny na obr. 3.1a.

- ***Vzorky určené pro tahovou zkoušku***

Rozměry vzorků pro tahovou zkoušku byly určeny dle ČSN EN 10002–1. Z důvodu omezených rozměrů polotovarových plechů byly zvoleny poměrné zkušební tyče dle uvedené normy. Vzorky byly připraveny přímo na laseru, bez další úpravy. Rozměry zkušebních tyčí pro tahovou zkoušku jsou znázorněny na obr. 3.1b.



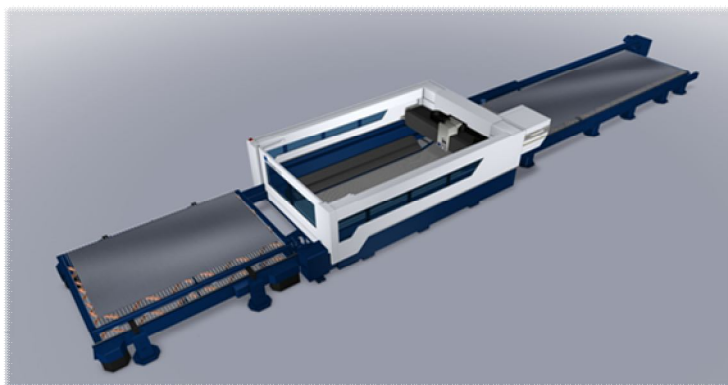
3.3 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A JEHO PARAMETRY

Byl použit laser TLF. Laser TLF je laser CO₂ a patří do třídy takzvaných plynových laserů. Laserové záření leží ve vlnové oblasti 10,6 μm. Zkratka TLF znamená TRUMPF Laser Frekvenčně buzený.

Vlastnosti laseru TLF:

- Vysokovýkonný laserový řezací stroj s lineárními pohony. Stroj je vybaven dvěma lasery CO₂. Lineární pohony zajišťují zrychlení až 20 m·s⁻² a rychlosti 300 m·min⁻¹.
- Pracovní rozsah 2500 mm x 4000 mm (X x Y)
- Princip „létající optiky“: obrobek je v klidu, řezací hlavy se pohybují. Obrobek lze zpracovávat podle výběru jednou řezací hlavou nebo dvěma řezacími hlavami synchronně.
- Řezací hlavy jsou vybaveny vlastní kapacitní regulací odstupu. Udržuje vzdálenost mezi tryskou a povrchem obrobku konstantní. Tím lze zabránit kolizi mezi plechem a řezací hlavou.
- Autofokusační funkce AutoLas Plus přizpůsobuje polohu fokusu v závislosti na druhu a na tloušťce materiálu. Přemístění ohniska, vyvolané různými délkami paprsku, nad pracovní rozsah se automaticky kompenzuje.
- Řezné plyny O₂ nebo N₂. /1/

Vzorky byly připraveny ve firmě TRUMPF s.r.o. v Liberci na laseru TRUMATIC HSL 4002 C. Jedná se o laser CO₂, který se obchodně nazývá laser TLF. Laser HSL obsahuje 2 laserové hlavy o výkonech 2 x 3,6 kW.



Obr. 3.2 – Laser Trumatic HSL 4002C.



3.3.1 PARAMETRY LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ

Při řezání vzorků byly nastaveny tyto parametry řezání:

- 1) Použitý řezný plyn: Kyslík.
- 2) Použitý tlak kyslíku: 5 bar.
- 3) Ochranná atmosféra: Stlačený vzduch z kompresoru, který je čištěn přes řadu filtrů.
- 4) Výkon: Pro řezání byl použit výkon 1000 W.
- 5) Mód paprsku: TEM₀₀.
- 6) Výstupní čočka: 5" (tj. 127 mm).
- 7) Vzdálenost trysky od řezaného materiálu: 0,7 mm.
- 8) Ohnisko paprsku: Na povrchu materiálu.
- 9) Průměr výstupní plynové trysky: 0,8 mm.
- 10) Rychlost řezání: 2500 mm·min⁻¹, 5000 mm·min⁻¹, 6500 mm·min⁻¹.
- 11) Řezná spára: 0,150 mm

Nastavené parametry byly zvoleny dle tloušťky materiálu a druhu materiálu.

Parametr, který byl měněn, byla rychlost řezání. Rychlosti řezání byly zvoleny v poměru k nastavené hodnotě, kterou udává firemní předpis. Pro plechy tloušťky 1,5 mm a 2 mm je nastavena rychlost řezu 5000 mm·min⁻¹. Od této rychlosti byly zvoleny další rychlosti: O polovinu nižší rychlost tj. 2500 mm·min⁻¹ a rychlost 6500 mm·min⁻¹, která nemohla být zvolena rychlost o polovinu vyšší, aby interval rychlostí řezání byl symetrický, neboť by došlo k neproříznutí materiálu.

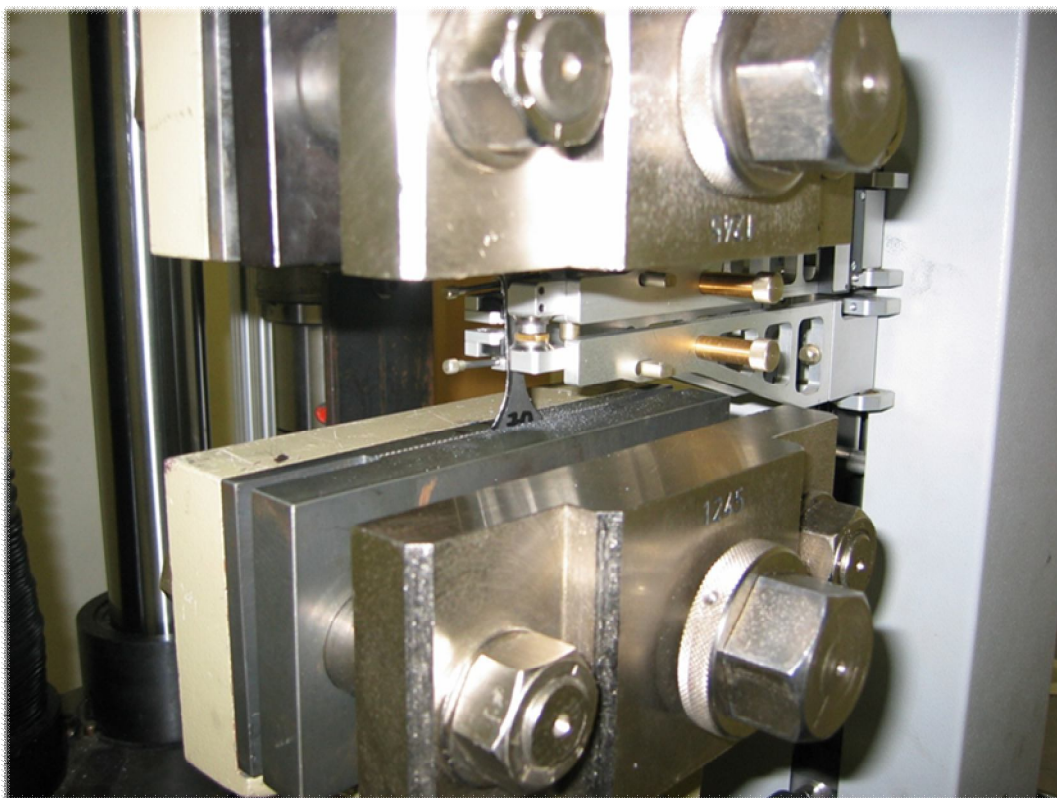
3.4 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM - MĚŘENÍ

Důvodem použití statické zkoušky tahem v experimentální části bylo zjistit, zdali rychlost řezání laserem má vliv na mechanické vlastnosti materiálů. S předpokladem, že drsnost po řezání laserem u plechů malých tloušťek může ovlivnit mechanické vlastnosti, bylo cílem zjistit, zdali při řezání laserem při různých rychlostech řezání nevznikají trhliny na povrchu materiálu, které by mohly být iniciátory porušení.

Pro určení základních mechanických hodnot byla provedena statická zkouška tahem dle ČSN EN 10002-1. Byly zjišťovány následující veličiny - mez kluzu **R_{p0,2}**, mez pevnosti **R_m** a tažnost **A_{20mm}**.

Měření probíhalo na zkušebním trhacím zařízení **TIRA test 2300** v laboratoři KSP na TUL. Upnutí zkušebních tyček v trhacím zařízení je znázorněno na obr. 3.3.

Pro vlastní měření a následné statistické vyhodnocení bylo použito 5 vzorků z každé série rychlostí a druhů materiálů. Jednotlivé vzorky jsou definované v tab. 3.1.



Obr. 3.4 – Uchycení zkušebních tyček v trhacím zařízení TIRA test 2300.

Tab. 3.1 - Značení vzorků pro statickou zkoušku tahem

rychlost řezání [mm·min ⁻¹]		materiál				
		ocel DC01A	BTR 165 kalen	BTR 165 žhán	DOCOL 1200M	TWIP 1200
v ₁	2500	21,22,23,24,25	36,37,38,39,40	51,52,53,54,55	66,67,68,69,70	81,82,83,84,85
v ₂	5000	26,27,28,29,30	41,42,43,44,45	56,57,58,59,60	71,72,73,74,75	86,87,88,89,90
v ₃	6500	31,32,33,34,35	46,47,48,49,50	61,62,63,64,65	76,77,78,79,80	91,92,93,94,95

Pro jednotlivé materiály a rychlosti řezání laserem byla vypočítána průměrná hodnota a směrodatná odchylka. Výpočet byl proveden u meze kluzu $R_{p0,2}$, meze



pevnosti R_m a tažnosti A_{20mm} . Tyto hodnoty jsou zaneseny v tabulkách a znázorněny v grafech.

Pro určení závislosti či nezávislosti rychlosti řezání laserem na mechanických vlastnostech jsem použila F-test a T-test. Způsob výpočtu je uveden v příloze 4.

3.5 MĚŘENÍ DRSNOSTI ŘEZANÉHO POVRCHU

Drsnost byla měřena pomocí drsnoměru MarSurf PS1 a vyhodnocována v programu MarSurf PS1 Explorer [V1.00-10].

Vzorky byly uchyceny do kolmé polohy vůči hrotu drsnoměru. Na každé ploše byla drsnost měřena třikrát. Tedy na každém vzorku bylo provedeno celkem šest měření.

Hrot měřidla byl nastavován do střední části plochy vzorku. Měření probíhalo v podélném směru viz obr. 3.3. Tedy ve směru řezu laserem. Důvodem volby podélného směru byla jednak tloušťka materiálu, ale především mikroskopické snímky, ze kterých je patrný průběh žlábků na vyříznutých vzorcích viz kap. 4.2.

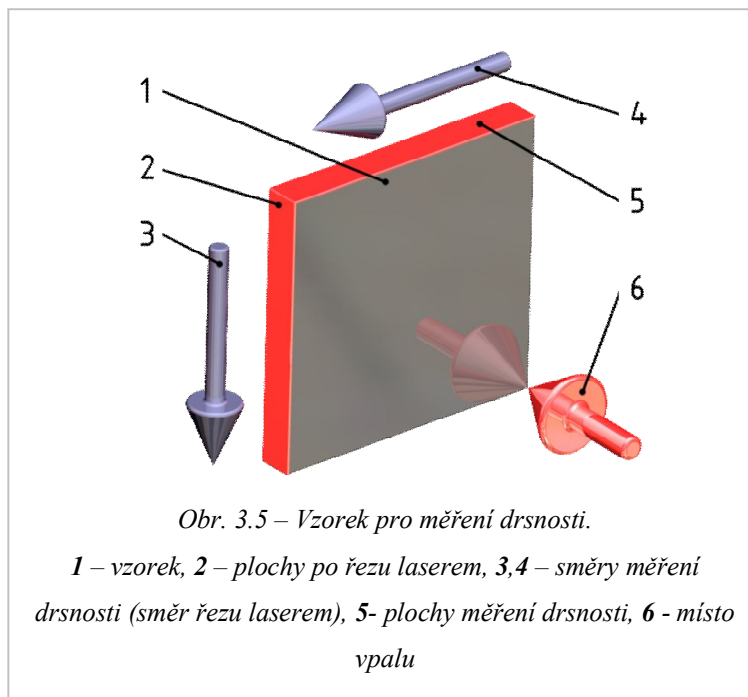
Při každém měření na jedné ploše byl vždy hrot měřidla posunut, tak aby byly měřeny vždy jiné úseky.

Každý vzorek byl tedy měřen třikrát vždy na jedné ploše řezu. Výsledky byly zaznamenávány v programu MarSurf PS1 Explorer. Program umožňuje grafické znázornění průběhu drsnosti. V příloze 5 je pro ukázkou znázorněn průběh drsnosti pro vzorek č. 2.

Parametry měření drsnosti:

- měřená délka $L_t = 5,60$ mm
- rychlost měření $v_t = 0,5$ mm/s
- typ snímače $v_b = 350$ μ m
- měřené veličiny: R_a , R_z .
- použité vzorky: vyříznuté plechy na laseru o rozměrech 15 x 15 mm.

Způsob směrů měření je znázorněn na obr. 3.5.



3.6 PŘÍPRAVA METALOGRAFICKÝCH VÝBRUSŮ

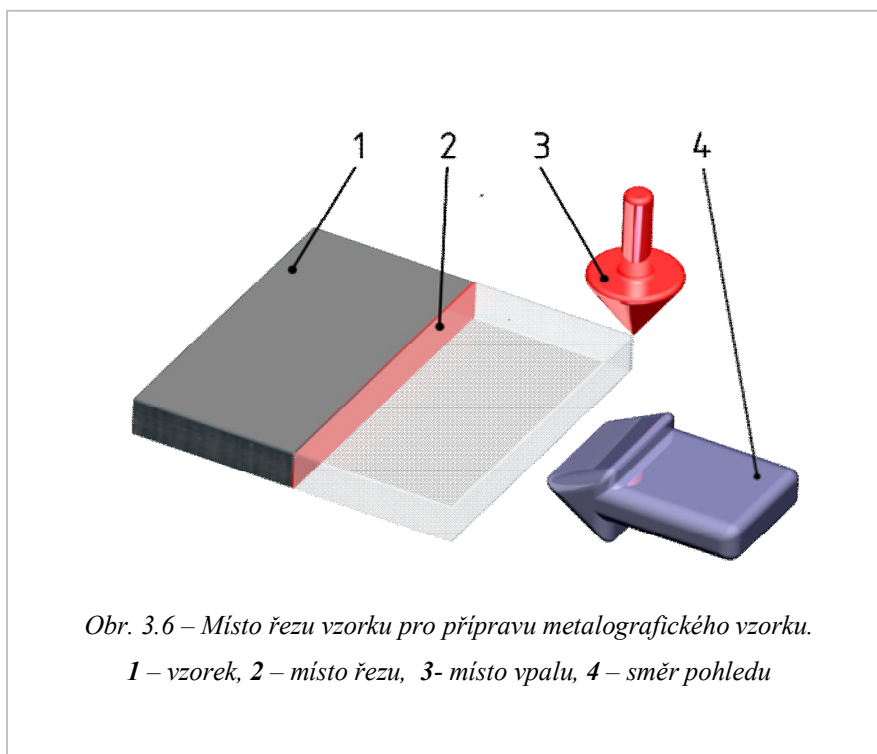
Pro určení mikrotvrdosti, tepelně ovlivněné oblasti a mikrostruktury byly v laboratoři KMT na TUL připraveny metalografické výbrusy.

Vzorky byly připravovány z vyříznutých plechů na laseru popsáných v kapitole 3.2.

Postup přípravy vzorků:

1. Řezání vzorků na pile Delta abrasiment cutter. Místo řezu je na obr. 3.6.
2. Zalévání vzorků na zařízení Buehler simpliMet 1000- Automatic mounting press. Vzorky byly ve trojicích dle druhu materiálu zality do technického dentakrylu.
3. Broušení a leštění vzorků probíhalo ve čtyřech krocích na automatu Buehler – Phoenix Beta.
 - 1. broušení – abrazivo 45 μm , přitlačný tlak 15 N, otáčky kotouče 250 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$, sousledné otáčky vzorků a kotouče, čas broušení 5 minut.
 - 2. broušení – abrazivo 9 μm , přitlačný tlak 15 N, otáčky kotouče 150 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$, sousledné otáčky vzorků a kotouče, diamantová suspenze Metadi supreme, čas broušení 5 minut.

- 3. broušení – abrazivo 3 μm , přitlačný tlak 15 N, otáčky kotouče 150 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$, sousledné otáčky vzorků a kotouče, diamantová suspenze 40-6631F, čas broušení 3 minuty.
- leštění – abrazivo 0,05 μm , přitlačný tlak 15 N, otáčky kotouče 150 $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$, nesousledné otáčky vzorků a kotouče, suspenze Mastermet 2, čas leštění 2 minuty.



3.7 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI

Vyhodnocování mikrotvrdomosti bylo zvoleno jako indikátor tepelně ovlivněné oblasti při řezání laserem. Na mikrotvrdomosti lze vyhodnotit odhličení, zakalení či popuštění povrchové vrstvy. Mikrotvrdomost je hodnocena v závislosti na hloubce od místa řezu.

Mikrotvrdomost podle Vickerse byla měřena na připravených metalografických výbrusech na mikrotvrdoměru na katedře KMT na TUL.

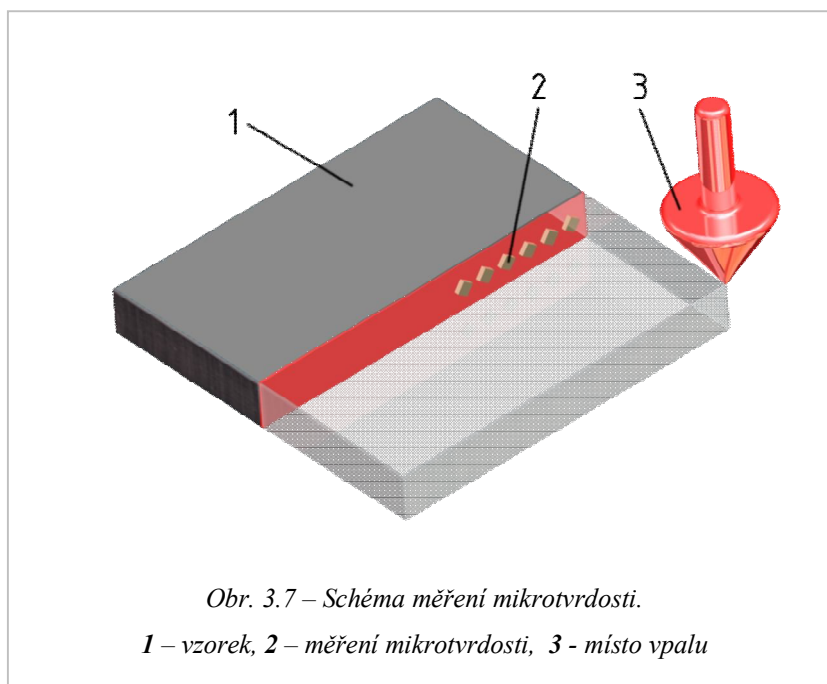
Parametry zkoušky:

zatížení: HV 0,05

zatížení: HV 0,3 pro určení tvrdosti v jádře

doba zatížení: 20 sekund.

Na obr. 3.7 jsou schematicky znázorněna místa na vzorcích, kde byla mikrotvrдость měřena.



Mikrotvrđost byla měřena jednak v úsecích od povrchové vrstvy a jednak v jádře. Měření mikrotvrđosti v jádře bylo měřeno z důvodu posouzení hodnot, které byly naměřeny v tepelně ovlivněné oblasti.



4 HODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKY

4.1 VÝSLEDKY STATICKÉ ZKOUŠKY TAHEM

Jednotlivé výsledky z tahové zkoušky jsou znázorněny v tabulkách a pro lepší orientaci zobrazeny v grafech.

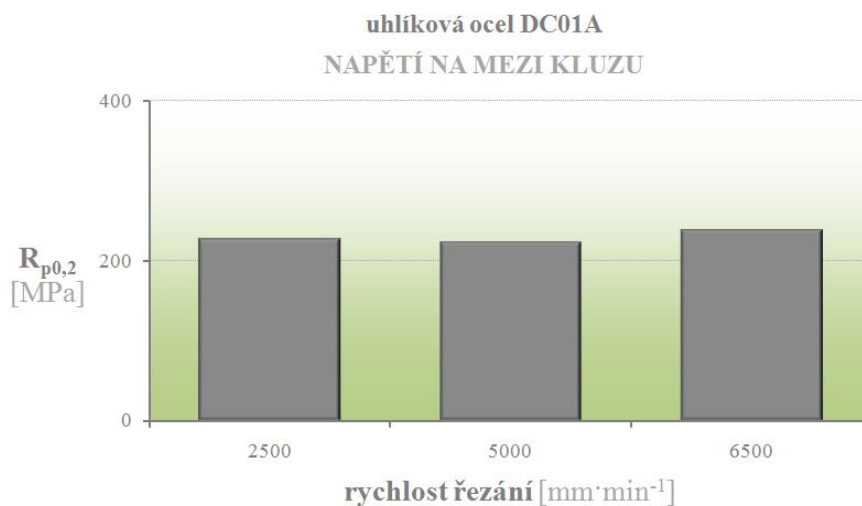
Hodnoty $R_{p0,2}$, R_m a A_{20mm} jsou vztaženy k rychlosti řezání. Důvodem porovnání mechanických hodnot k rychlosti řezání je to, že rychlost byla parametrem, který byl v průběhu řezání na laseru měněn. Hodnoty rychlostí jsou $2500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $6500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Jednotlivé naměřené hodnoty jsou srovnávány s hodnotami, které jsou udávány materiálovým listem příslušného materiálu. Posouzení naměřené tažnosti vzhledem k materiálovým listům nebylo možné z důvodů použití tažnosti A_{20mm} . V materiálových listech tato tažnost není uváděna.

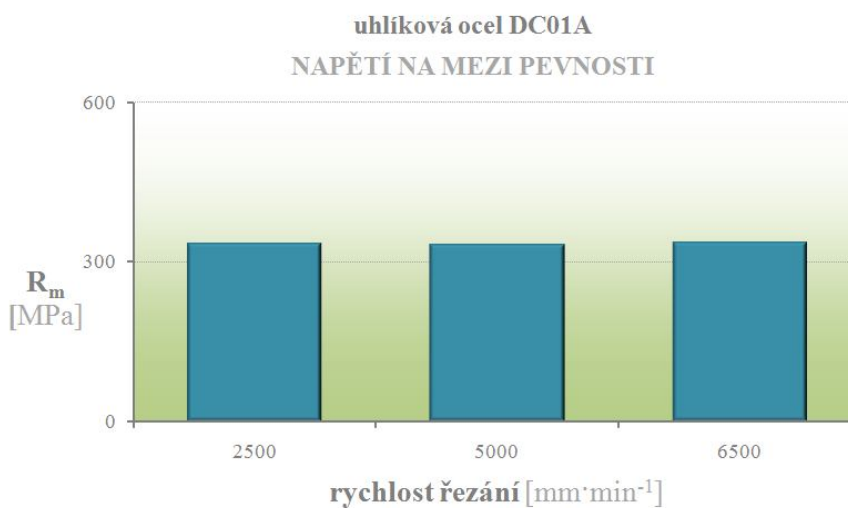
U uhlíkové oceli DC01A byla naměřena $R_{p0,2}$ v rozmezí od 221 MPa do 242 MPa. Hodnota meze pevnosti R_m od 332 MPa do 337 MPa. a hodnota A_{20mm} od 48 % do 57 %. V materiálovém listu je hodnota $R_{p0,2}$ uvedena maximálně 280 MPa. Hodnota R_m od 270 MPa do 410 MPa. Naměřené hodnoty tedy odpovídají materiálovému listu.

Tab. 4.1. - Výsledky tahové zkoušky – uhlíková ocel DC01A

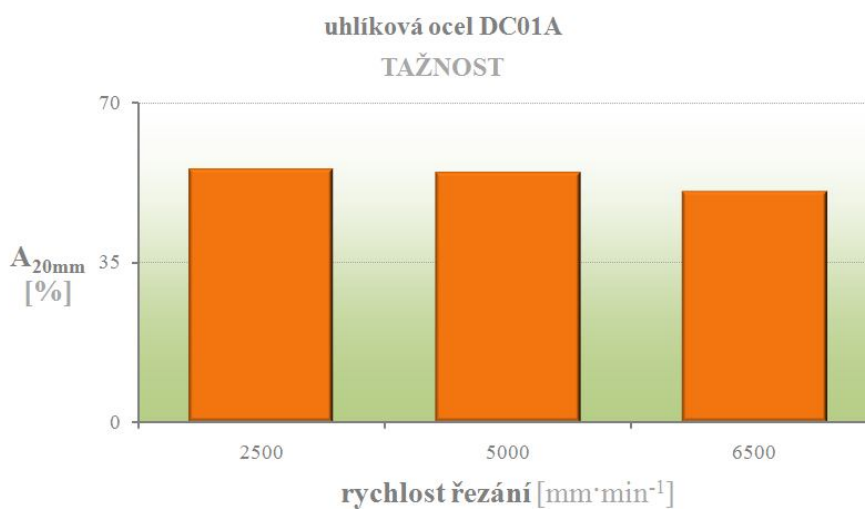
materiál	uhlíková ocel DC01A		
	rychlosti řezání [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]		
	2500	5000	6500
$R_{p0,2}$ [MPa]	228 ± 5	223 ± 2	238 ± 4
R_m [MPa]	334 ± 1	333 ± 1	336 ± 1
A_{20mm} [%]	55 ± 1	55 ± 2	50 ± 2



Obr. 4.1 – Závislost $R_{p0,2}$ na rychlosti řezání laserem – uhliková ocel DC01A.



Obr. 4.2 – Závislost R_m na rychlosti řezání laserem – uhliková ocel DC01A.

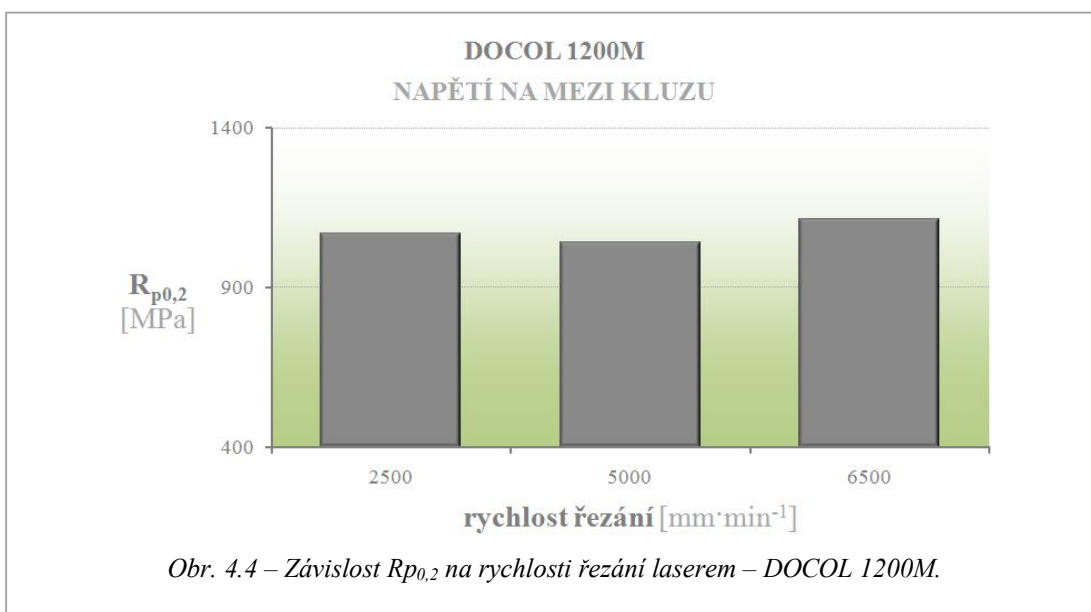


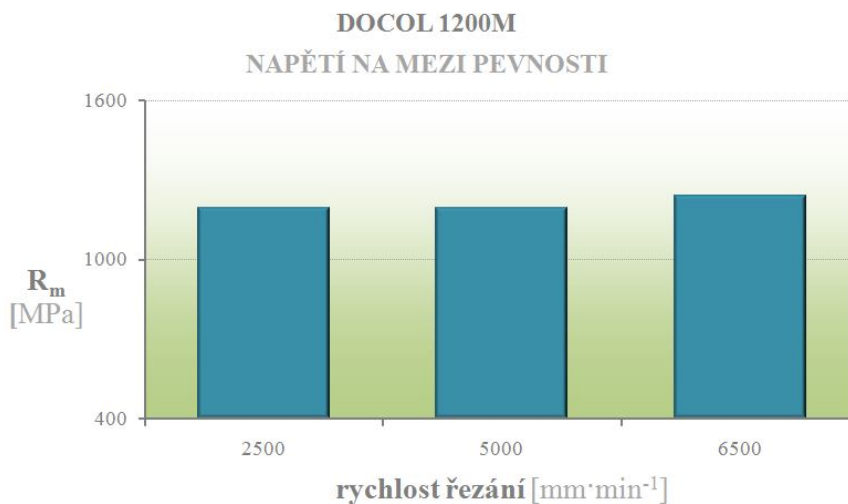
Obr. 4.3 – Závislost A_{20mm} na rychlosti řezání laserem - uhliková ocel DC01A.

U vysokopevnostní oceli DOCOL 1200M byly naměřeny hodnoty $R_{p0,2}$ v rozmezí od 1039 MPa do 1144 MPa. V materiálovém listu je udávána hodnota 1200 MPa až 1400 MPa. Hodnota napětí na mezi kluzu je tedy v řádu pěti desítek podkročena. Hodnota meze pevnosti R_m od 1189 do 1380 MPa. a hodnota A_{20mm} od 14 % do 20 %. Z hlediska meze pevnosti byla naměřena vyšší hodnota, než udává materiálový list v rozmezí hodnot od 950 MPa do 1200 MPa.

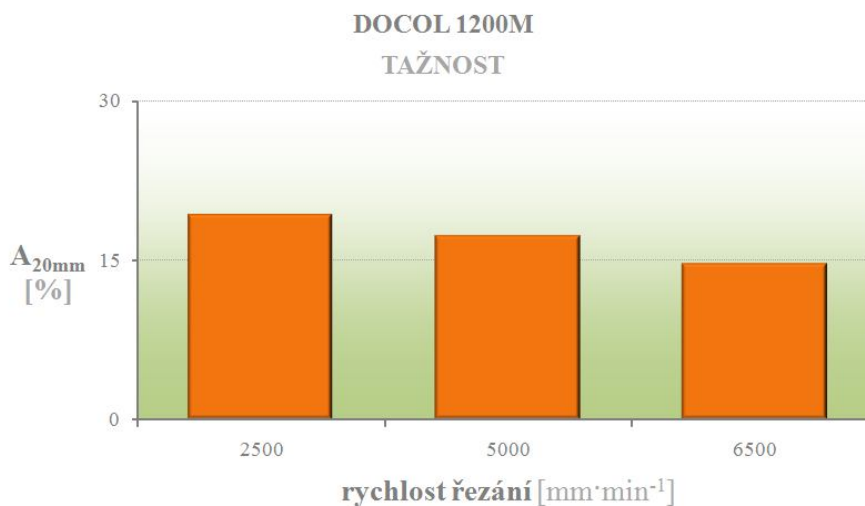
Tab. 4.2. - Výsledky tahové zkoušky – DOCOL 1200M

materiál	DOCOL 1200M					
	rychlosti řezání [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]					
	2500		5000		6500	
$R_{p0,2}$ [MPa]	1070	± 35	1040	± 43	1113	± 31
R_m [MPa]	1194	± 4	1193	± 4	1239	± 79
A_{20mm} [%]	19	± 1	17	± 2	15	± 1



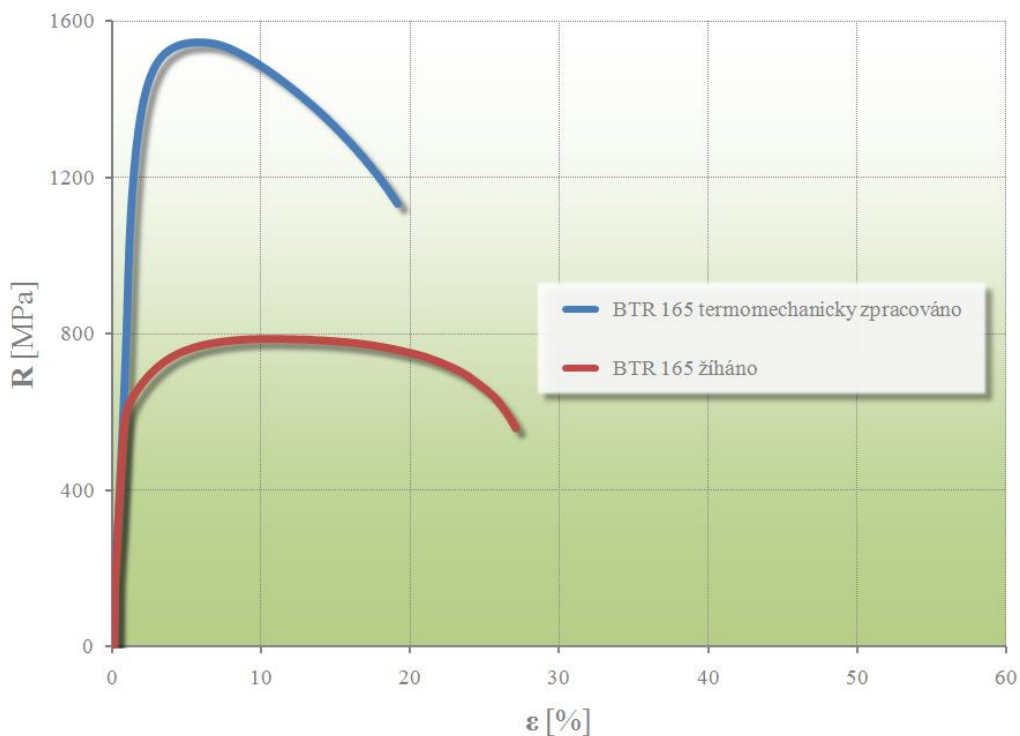


Obr. 4.5 – Závislost R_m na rychlosti řezání laserem – DOCOL 1200M.



Obr. 4.6 – Závislost $A_{20\text{mm}}$ na rychlosti řezání laserem – DOCOL 1200M.

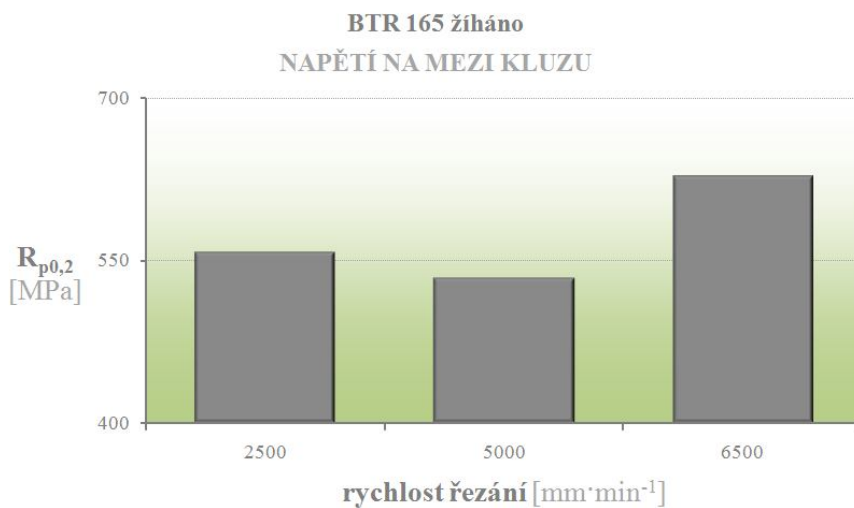
U vysokopevnostní oceli BTR 165 je zajímavé posoudit současně i vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti oceli. Jednak byla zkoušena ocel BTR 165, která byla pouze žhána a ocel BTR 165, která byla termomechanicky zpracována. Dle předpokladů by měla u termomechanicky zpracované oceli růst mez pevnosti a napětí na mezi kluzu. Na obr. 4.7 je dle materiálového listu znázorněn průběh napětí na mezi kluzu a tažnost v závislosti na druhu oceli BTR dle tepelného zpracování.



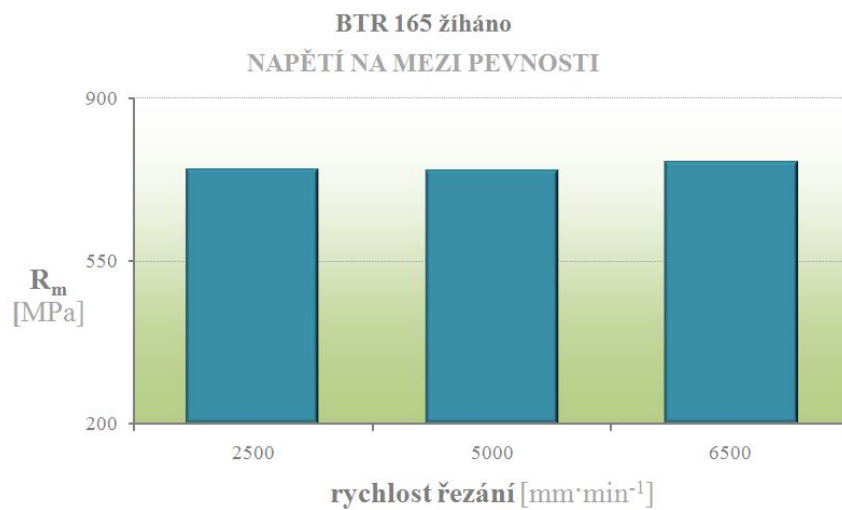
Obr. 4.7 – Závislost napětí na mezi kluzu a tažnosti v závislosti na tepelném zpracování oceli BTR 16.

Tab. 4.3. - Výsledky tahové zkoušky – BTR 165
žiháno

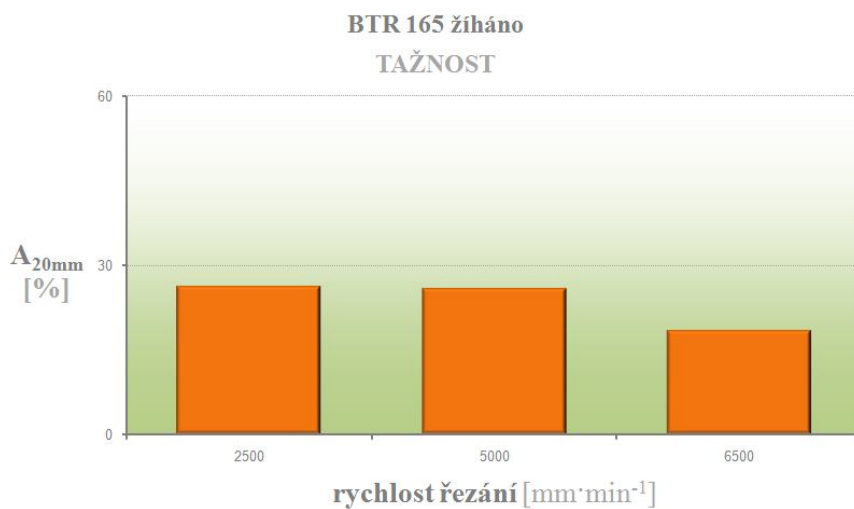
materiál	BTR 165 žiháno					
	rychlosti řezání [mm·min ⁻¹]					
	2500		5000		6500	
$R_{p0,2}$ [MPa]	557	± 19	533	± 10	627	± 7
R_m [MPa]	747	± 2	746	± 2	763	± 3
A_{20mm} [%]	26	± 1	26	± 1	18	± 1



Obr. 4.8 – Závislost $R_{p0,2}$ na rychlosti řezání laserem – BTR 165 žiháno.



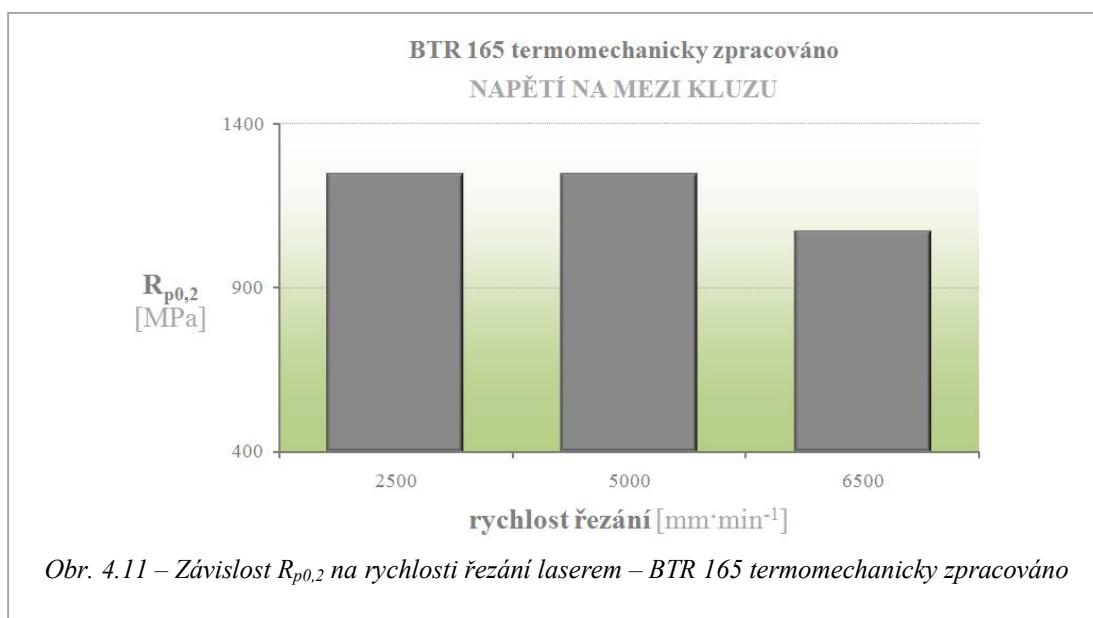
Obr. 4.9 – Závislost R_m na rychlosti řezání laserem – BTR 165 žiháno.



Obr. 4.10 – Závislost $A_{20\text{mm}}$ na rychlosti řezání laserem – BTR 165 žiháno.

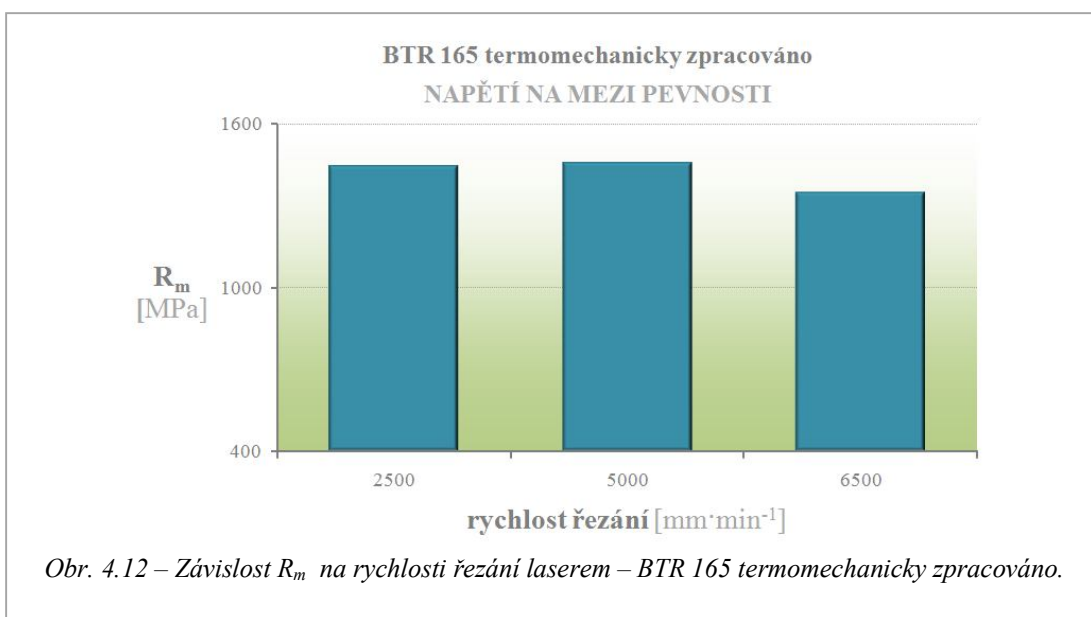


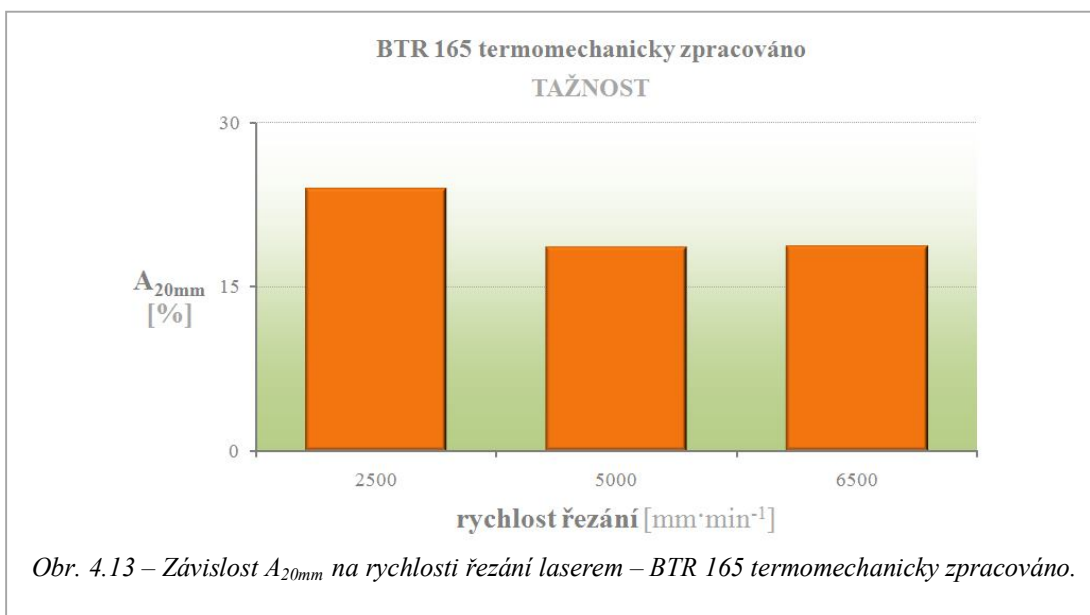
Tab. 4.4 - Výsledky tahové zkoušky – BTR 165 termomechanicky zpracováno





materiál	BTR 165 termomechanicky zpracováno					
	rychlosti řezání [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]					
	2500		5000		6500	
$R_{p0.2}$ [MPa]	1248	± 3	1247	± 38	1071	± 10
R_m [MPa]	1445	± 5	1457	± 3	1347	± 23
$A_{20\text{mm}}$ [%]	24	± 1	19	± 1	19	± 1





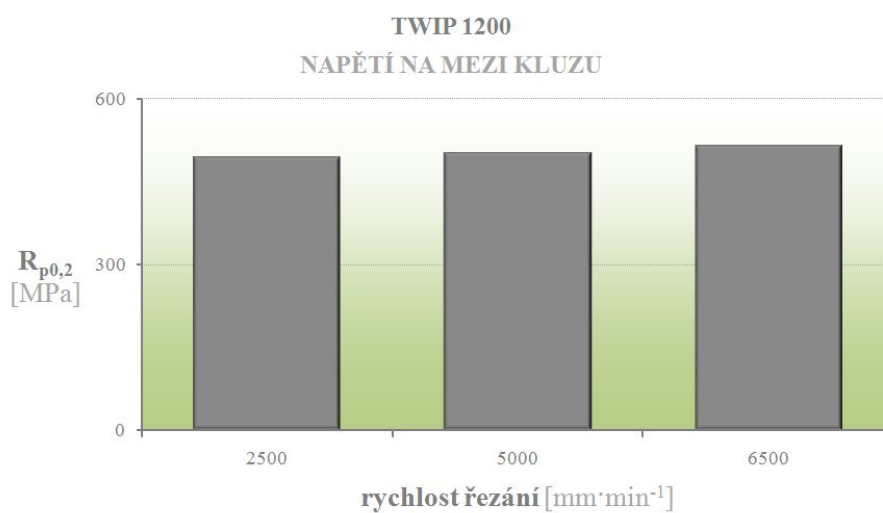
U oceli BTR 165 žíhané byly naměřeny hodnoty $R_{p0,2}$ v rozmezí od 523 MPa do 634 MPa. Materiál termomechanicky zpracovaný má napětí na mezi kluzu mezi 523 MPa až 634 MPa. Mez pevnosti v tahu je u termomechanicky zpracovaného materiálu 1460 MPa, naproti tomu pouze žíhaný materiál má mez pevnosti v tahu okolo 750 MPa. Naměřené hodnoty tedy souhlasí s materiálovým listem, kde R_m pro žíhanou ocel je větší než 500 MPa a pro termomechanicky zpracovaný materiál je R_m větší než 1400 MPa. Mez kluzu $R_{p0,2}$ dle materiálového listu je pro žíhanou ocel větší než 400 MPa a pro termomechanicky zpracovanou ocel větší než 1400 MPa. Naměřené hodnoty $R_{p0,2}$ opět souhlasí s materiálovým listem.

U oceli BTR 165 je z výsledků tahové zkoušky patrný malý rozdíl mezi mezí kluzu a mezí pevnosti v tahu.

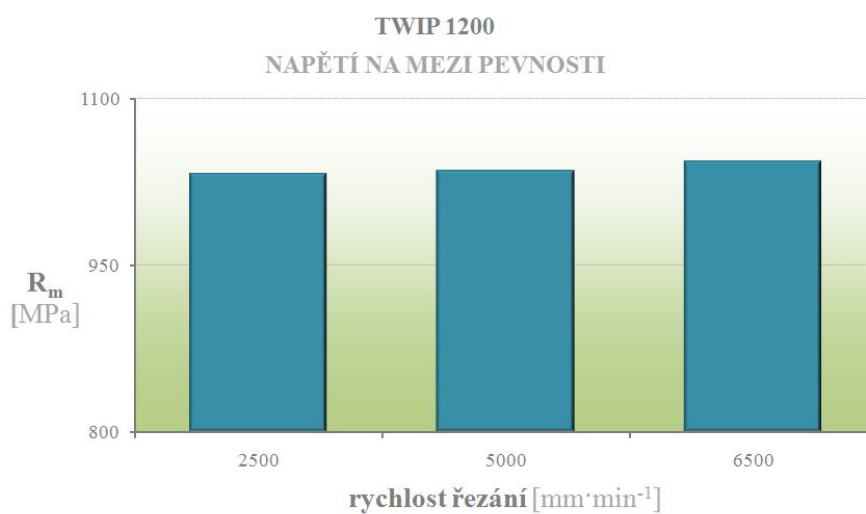
Posledním zkoušeným materiálem byla TWIP ocel. TWIP ocel má zásadní mechanickou vlastnost, kterou je velmi vysoká tažnost, která se pohybuje okolo 60 %. Mez pevnosti v tahu je také velmi dobrá a to až 1200 MPa. Napětí na mezi kluzu je okolo 500 MPa. Porovnání s materiálovým listem nebylo možné, neboť nebyl od výrobce poskytnutý. TWIP ocel je materiál, který je stále ve vývoji a tudíž k němu výrobce neposkytuje bližší informace.

Tab. 4.5. - Výsledky tahové zkoušky – TWIP 1200

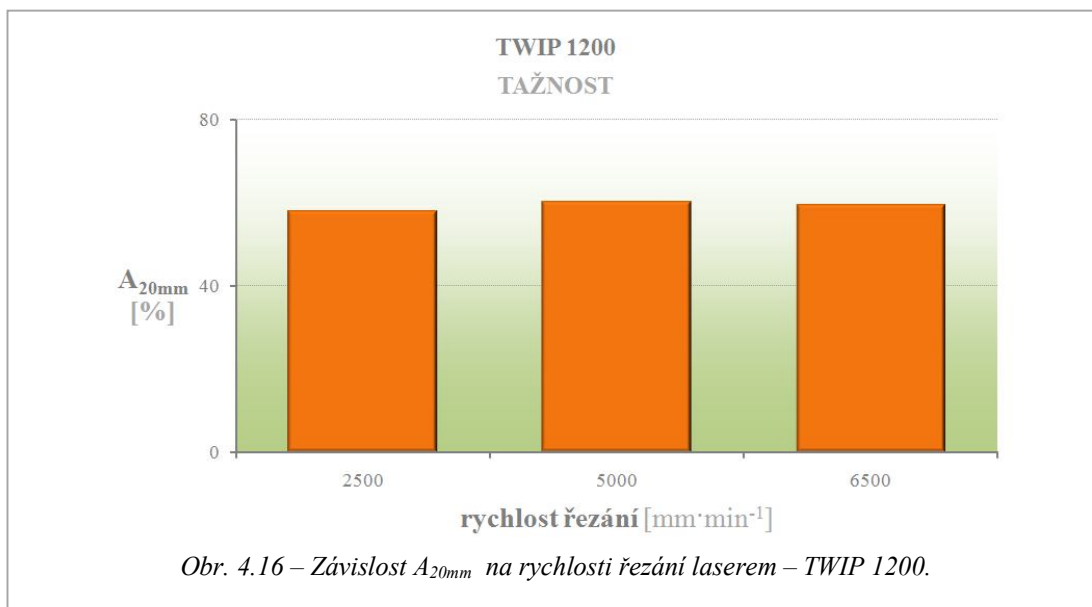
materiál	TWIP 1200		
	rychlosti řezání [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]		
	2500	5000	6500
$R_{p0,2}$ [MPa]	494 \pm 30	502 \pm 4	515 \pm 13
R_m [MPa]	1033 \pm 4	1035 \pm 4	1044 \pm 2
$A_{20\text{mm}}$ [%]	58 \pm 2	60 \pm 1	59 \pm 5



Obr. 4.14 – Závislost $R_{p0,2}$ na rychlosti řezání laserem – TWIP 1200.

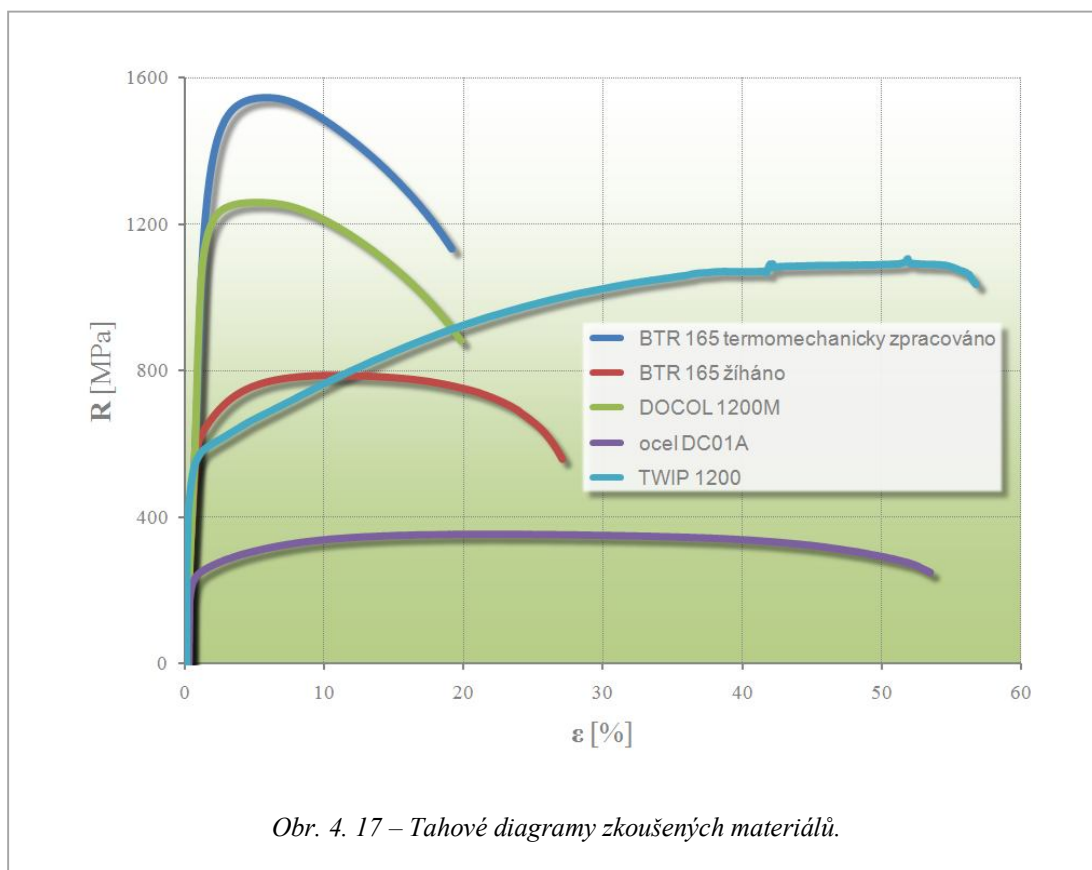


Obr. 4.15 – Závislost R_m na rychlosti řezání laserem – TWIP 1200.



Z výsledků statické zkoušky tahem plyne, že rychlost řezání laserem nemá vliv na mechanické vlastnosti. Tvrzení jsem si ověřila statistickou metodou dvouvýběrového F-testu a T-testu. Způsob výpočtu je znázorněn v příloze 4. Ověřil, že mechanické vlastnosti nejsou závislé na rychlosti řezání laserem.

Příklad průběh jednotlivých tahových diagramů materiálů je pro ukázkou znázorněn na obr. 4.17 níže.



4.2 SNÍMKY POVRCHŮ PO ŘEZÁNÍ LASEREM

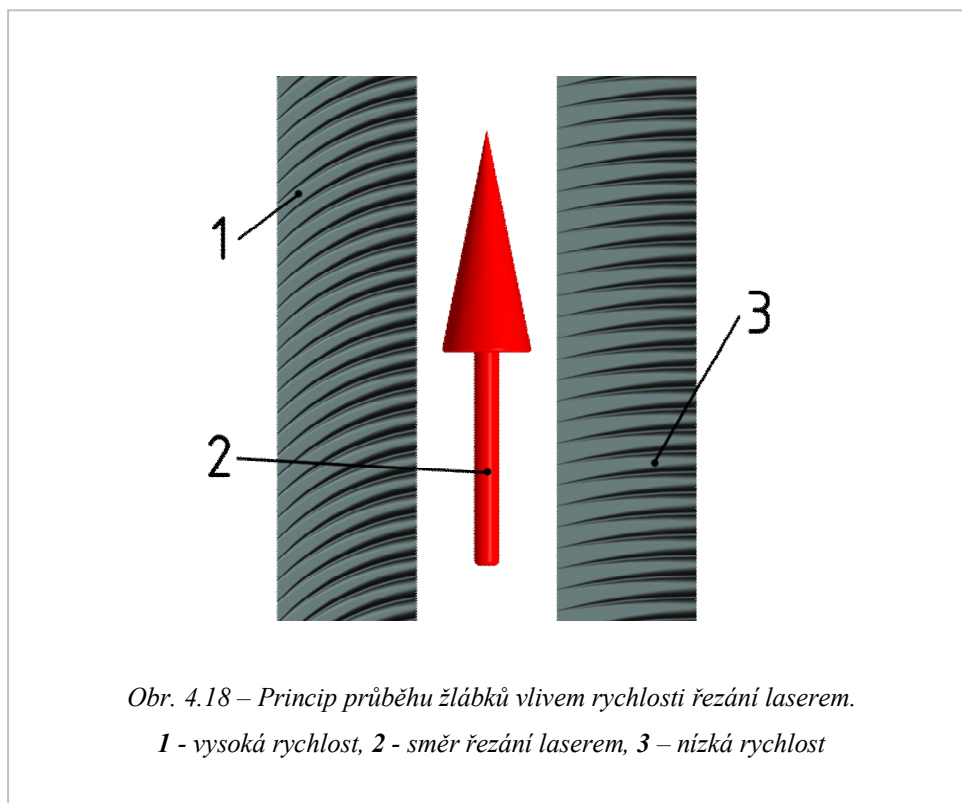
Pro celkové posouzení povrchu, který vznikl po řezání laserem, byly použity snímky z mikroskopu Leica DM2500P v laboratoři KSP na TUL.

Z mikroskopických snímků je patrný žlábkovitý reliéf, který je charakteristický pro laserové řezání. Při nízkých rychlostech řezu je evidentní, že je průběh žlábků téměř shodný s osou laserového paprsku. Čím je rychlost řezání vyšší, tím více se žlábků otáčí proti směru řezání. Princip průběhu žlábků vlivem rychlosti je znázorněn na obr. 4.18.

Důvodem vzniku žlábků je vyfukování plynu v procesu řezání laseru. Čím je rychlost řezání vyšší tím se žlábků více stáčí.

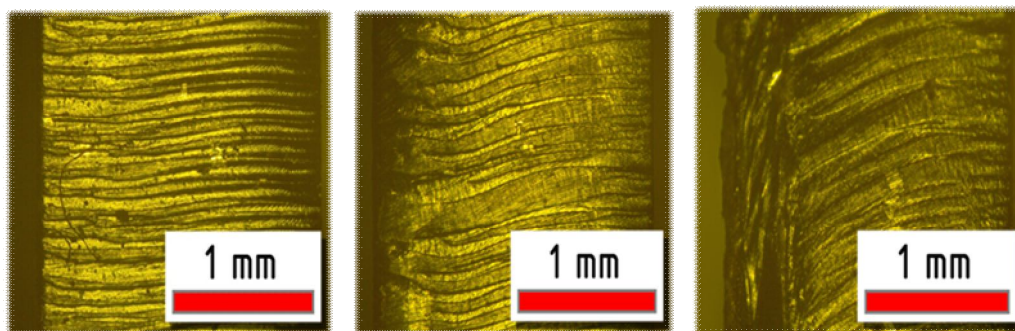
Z důvodu tvorby žlábků při řezání laserem bylo zvoleno jako další vyhodnocovací kritérium kvality řezu měření drsnosti povrchu v podélném směru.

Snímky jsou řazeny dle druhu materiálu a dále podle rychlosti řezání laserem. Směr řezání odpovídá obr. 4.18.



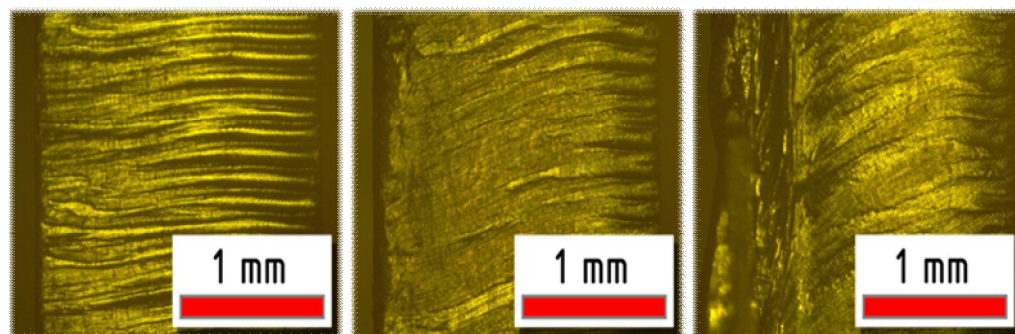
Obr. 4.18 – Princip průběhu žlábků vlivem rychlosti řezání laserem.

1 - vysoká rychlost, 2 - směr řezání laserem, 3 – nízká rychlost



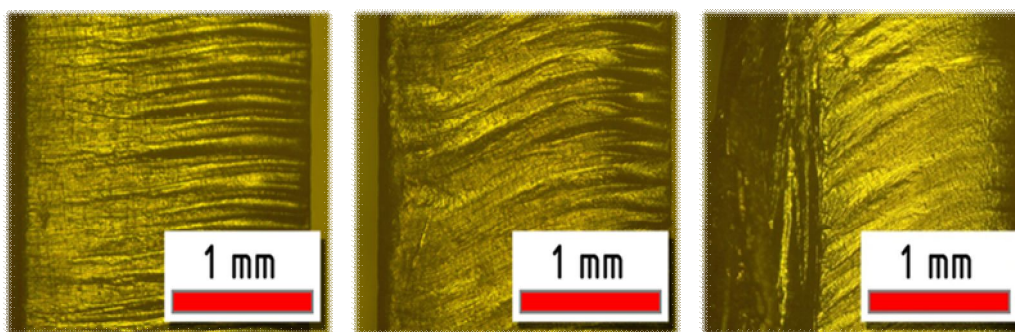
rychlost řezu 2500 mm·min⁻¹ rychlost řezu 5000 mm·min⁻¹ rychlost řezu 6500 mm·min⁻¹

Obr. 4.19 – Povrch řezné plochy - ocel DC01A.



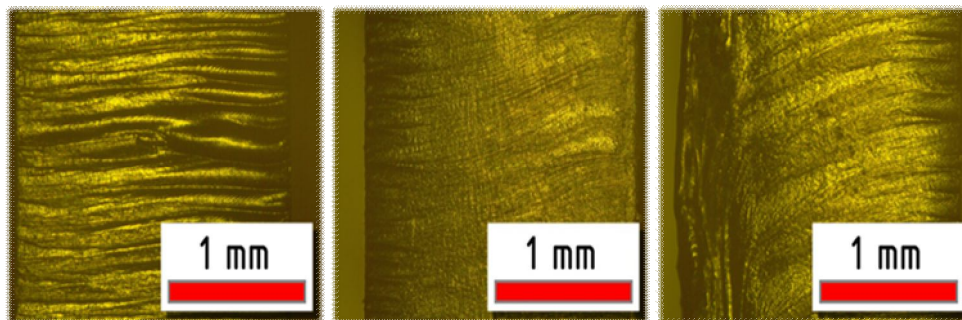
rychlost řezu 2500 mm·min⁻¹ rychlost řezu 5000 mm·min⁻¹ rychlost řezu 6500 mm·min⁻¹

Obr. 4.20 – Povrch řezné plochy - ocel Docol 1200M.



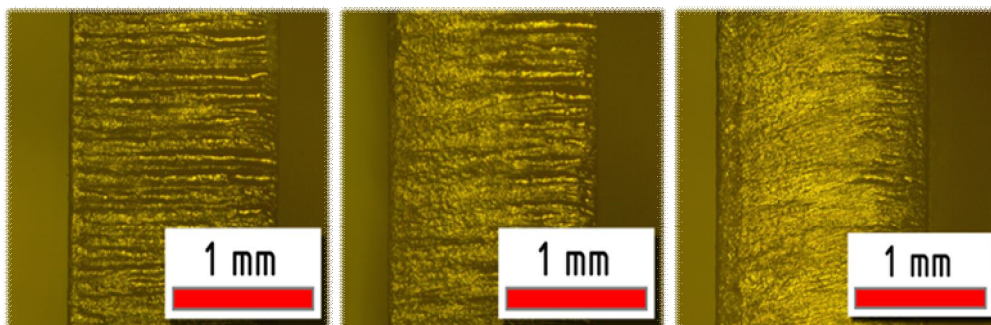
rychlost řezu 2500 mm·min⁻¹ rychlost řezu 5000 mm·min⁻¹ rychlost řezu 6500 mm·min⁻¹

Obr. 4.21 – Povrch řezné plochy - ocel BTR 165 žihano.



rychlost řezu 2500 mm·min⁻¹ rychlost řezu 5000 mm·min⁻¹ rychlost řezu 6500 mm·min⁻¹

Obr. 4.22 – Povrch řezné plochy - ocel BTR 165 termomechanicky zpracováno.



rychlost řezu 2500 mm·min⁻¹ rychlost řezu 5000 mm·min⁻¹ rychlost řezu 6500 mm·min⁻¹

Obr. 4.23 – Povrch řezné plochy - ocel TWIP 1200.

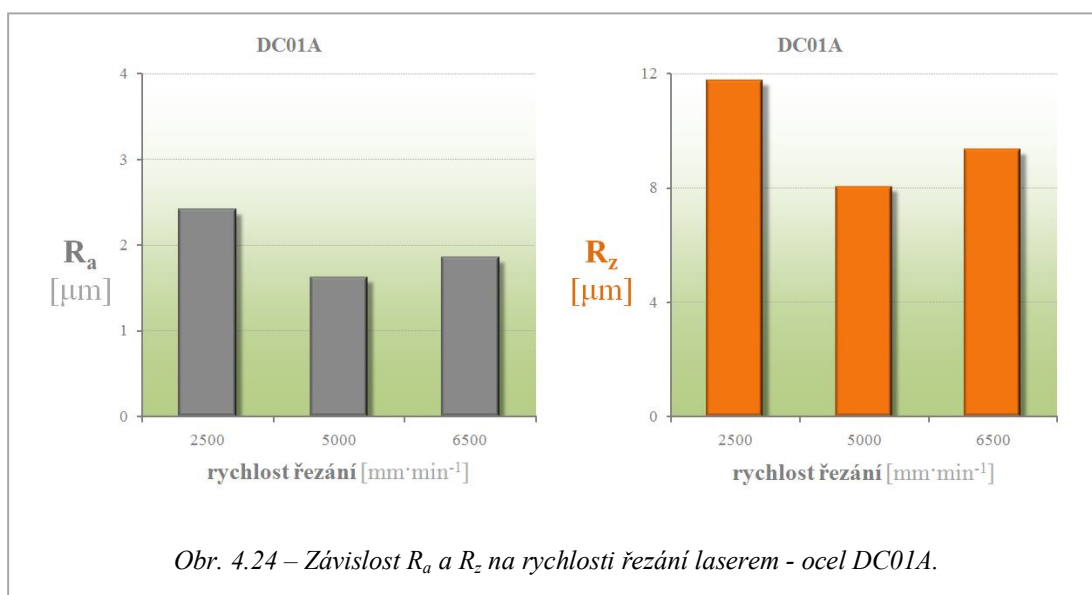
4.3 VÝSLEDKY ZKOUŠKY DRSNOSTI

Výsledky naměřených hodnot R_a a R_z jsou znázorněny v tab. 4.6.

U uhlíkové oceli je patrné snížení drsnosti při rychlosti 5000 mm·min⁻¹. Maximální drsnost $R_z = 13,6 \mu\text{m}$ při rychlosti 2500 mm·min⁻¹ a minimální $R_z = 5,9 \mu\text{m}$, při rychlosti 5000 mm·min⁻¹. Na obr. 4.25 je pro ukázkou porovnání žlábkovitosti z mikroskopických snímků a grafického průběhu reliéfu řezaného povrchu. Z obrázku je patrné, že podle drsnosti R_z je možné sledovat velikost žlábků, které vznikají při řezání.

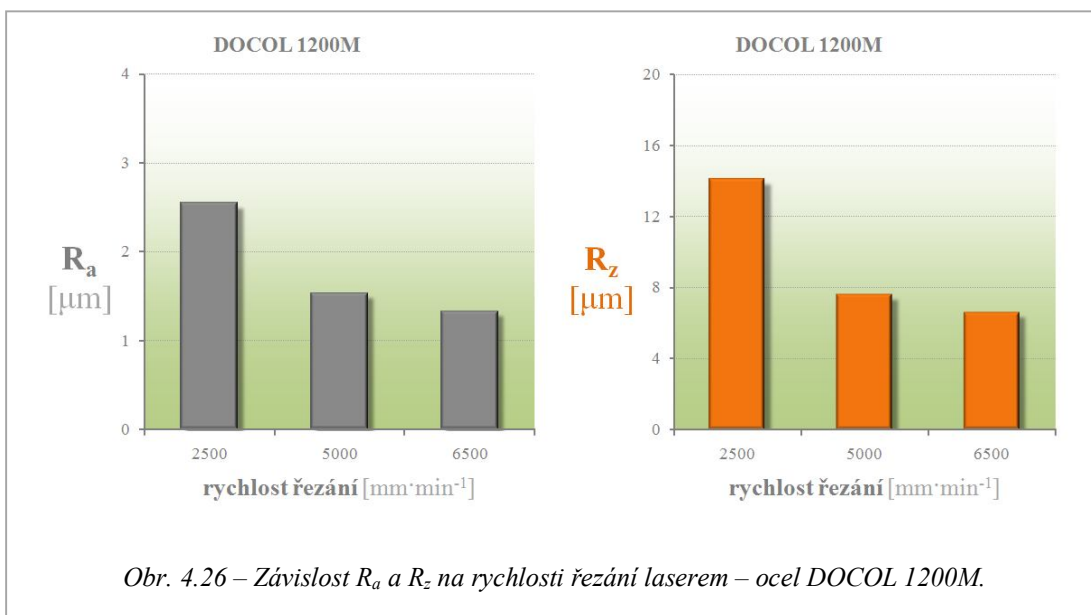
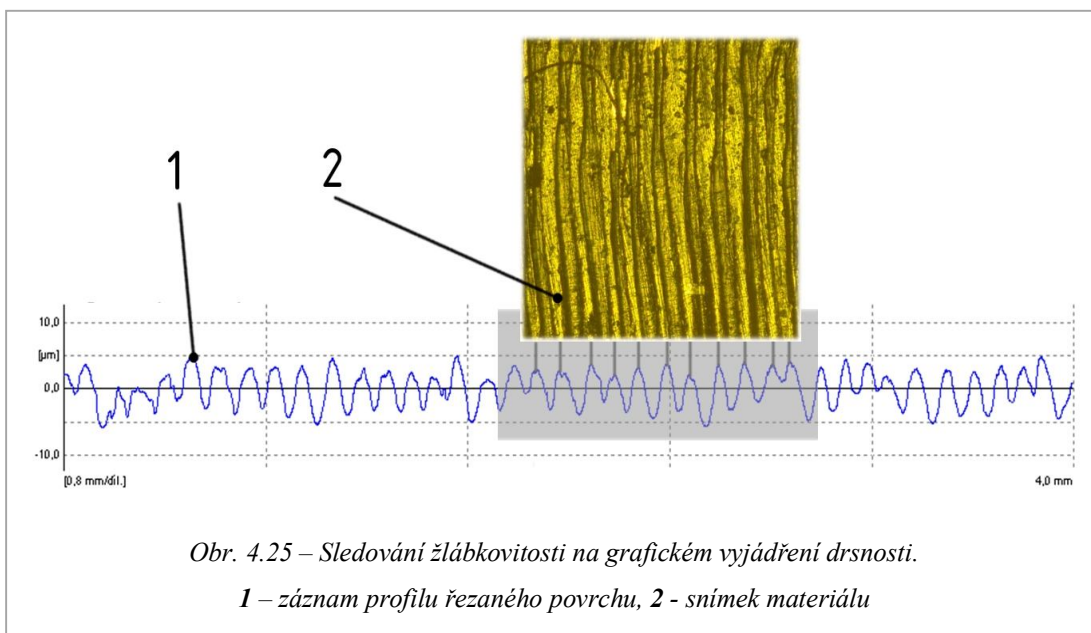
Tab. 4.6 – Výsledky drsnosti

rychlost řezání [mm·min ⁻¹]	2500		5000		6500	
materiál	R _a	R _z	R _a	R _z	R _a	R _a
uhlíková ocel DC01A	2,4 ± 0,2	11,8 ± 1,4	1,6 ± 0,3	8,1 ± 1,1	1,9 ± 0,2	9,3 ± 1,5
DOCOL 1200M	2,5 ± 0,2	14,1 ± 1,3	1,5 ± 0,2	7,6 ± 1,2	1,3 ± 0,2	6,6 ± 0,9
BTR 165 žiháno	2,8 ± 0,3	15,1 ± 1,4	1,8 ± 0,3	8,3 ± 1,4	1,1 ± 0,2	5,4 ± 1,1
BTR 165 kaleno do vody, žiháno	3,5 ± 0,3	19,7 ± 1,0	1,3 ± 0,3	7,0 ± 2,0	1,8 ± 0,3	8,1 ± 1,0
TWIP 1200	2,7 ± 0,1	15,1 ± 0,8	1,4 ± 0,4	8,2 ± 2,2	1,9 ± 0,5	10,5 ± 2,6



U oceli DOCOL 1200M sledujeme postupné snižování drsnosti se zvyšující se rychlostí řezání. Největší naměřená drsnost R_z byla naměřena 16,1 μm při rychlosti 2500 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Nejmenší naměřená drsnost $R_z = 5,4 \mu\text{m}$ byla při rychlosti 6500 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

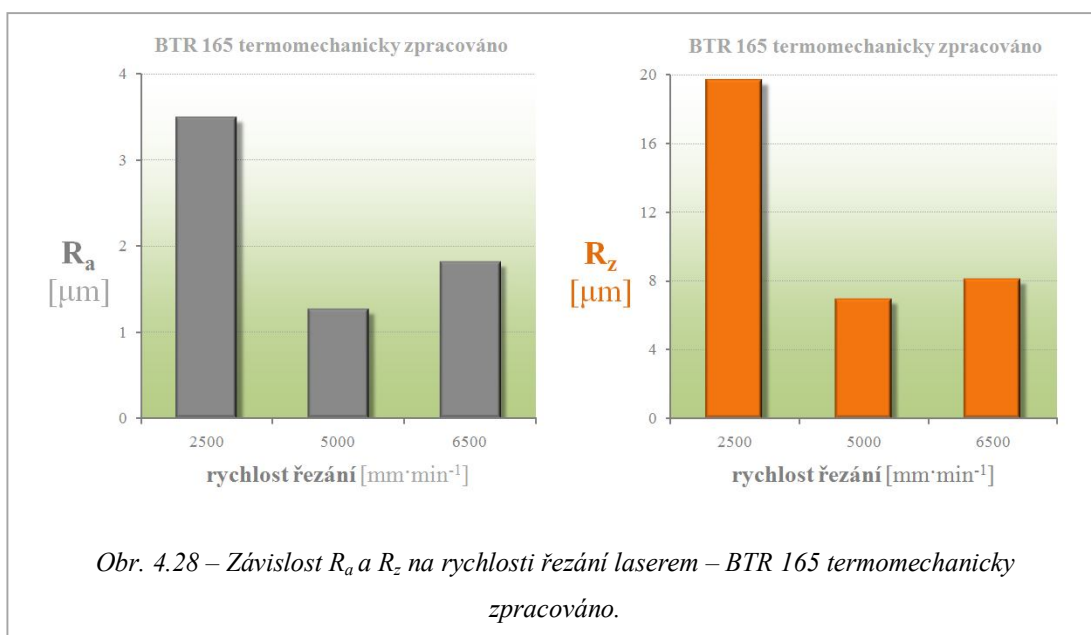
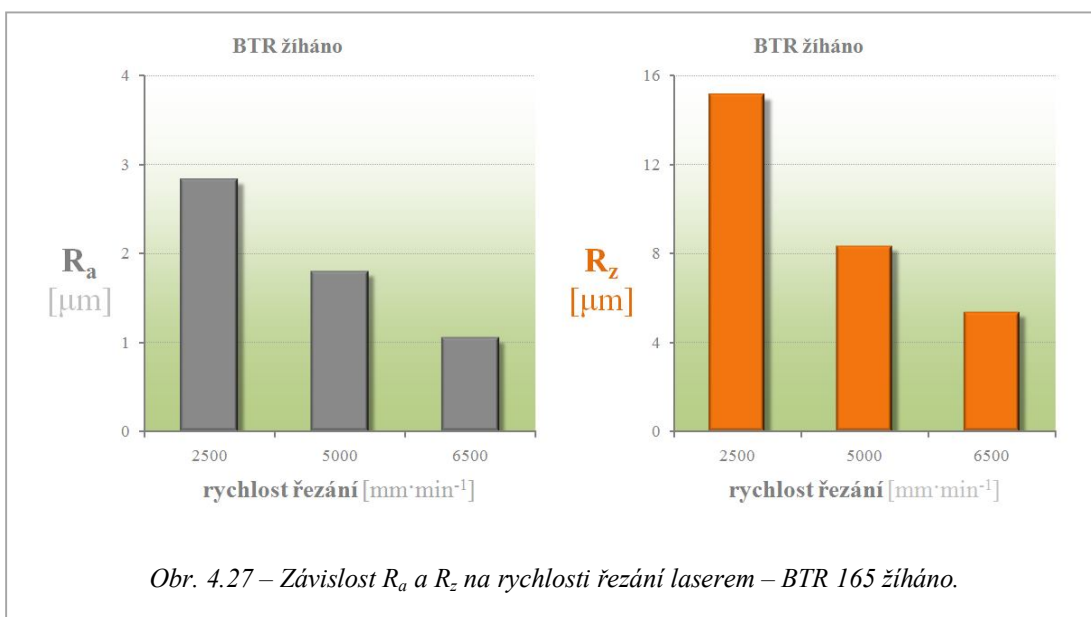
U oceli BTR 165 žiháno (obr. 4.27), je opět sledovatelná závislost drsnosti na rychlosti řezání. S rostoucí rychlostí řezání klesá drsnost. Při rychlosti 2500 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ je drsnost maximální $R_z = 16,6 \mu\text{m}$, naopak při rychlosti 6500 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ je drsnost minimální $R_z = 4 \mu\text{m}$.



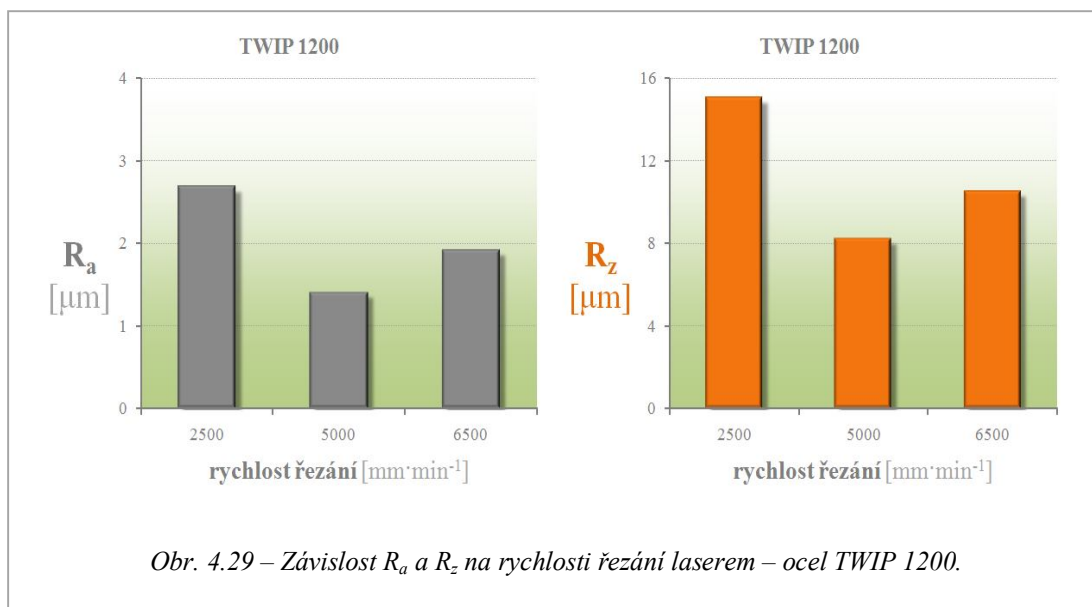
U oceli BTR 165 žíháné (obr. 4.27), je opět sledovatelná závislost drsnosti na rychlosti řezání. S rostoucí rychlostí řezání klesá drsnost. Při rychlosti 2500 mm·min⁻¹ je drsnost maximální $R_z = 16,6 \mu\text{m}$, naopak při rychlosti 6500 mm·min⁻¹ je drsnost minimální $R_z = 4 \mu\text{m}$.

U oceli BTR 165 termomechanicky zpracované (obr. 4.28) je možné sledovat stejný průběh drsnosti jako u oceli DC01A. Maximální hodnota drsnosti je při

nejmenší rychlosti $R_z = 21,7 \mu\text{m}$. Minimální hodnota drsnosti $R_z = 4,4 \mu\text{m}$ je při rychlosti $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



U oceli TWIP 1200 (obr. 4.29) je opět průběh podobný jako u oceli DC01A a oceli BTR 165 zušlechtěné. Maximální hodnota drsnosti je při nejmenší rychlosti $2500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a to $R_z = 16,3 \mu\text{m}$. Minimální drsnost $R_z = 5,8 \mu\text{m}$ je při rychlosti $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



Naměřené hodnoty vypovídají o tom, že největších drsností se dosahuje při nejmenších rychlostech řezání. Minimální hodnoty drsnosti jsou u oceli DOCOL 1200M a u oceli BTR 165 žíhané při rychlosti řezu 6500 mm·min⁻¹. U oceli DC01A, BTR 165 zušlechťené a TWIP oceli jsou minimální hodnoty drsnosti při rychlosti 5000 mm·min⁻¹.

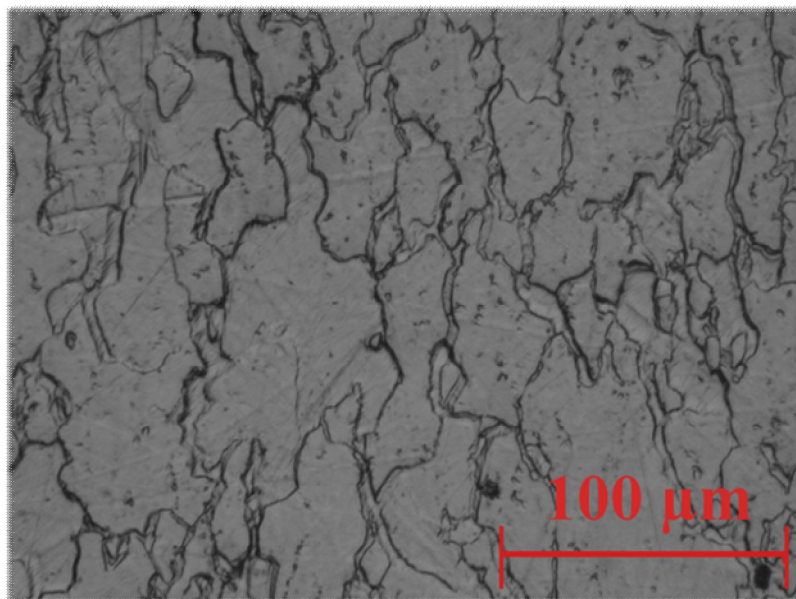
Výsledky drsností byly vyhodnoceny statisticky, tak jako u statické zkoušky tahem. Provedena byla analýza rozptylu. Způsob výpočtu je uveden v příloze 4. Z provedené zkoušky a statistické analýzy vyplývá, že drsnost závisí na rychlosti řezání laserem.

Při optimálních podmínkách řezání laserem lze dosáhnout hodnot drsnosti, které jsou v rozmezí hodnot, kterých je dosahování hrubováním. U dobře volených parametrů řezání, nejsou tedy většinou požadavky na další úpravy řezných hran.

4.4 VÝCHOZÍ STAV POUŽITÝCH MATERIÁLŮ – STRUKTURA, TVRDOST

4.4.1 MIKROSTRUKTURA A MIKROTVRDOST OCELI DC01A

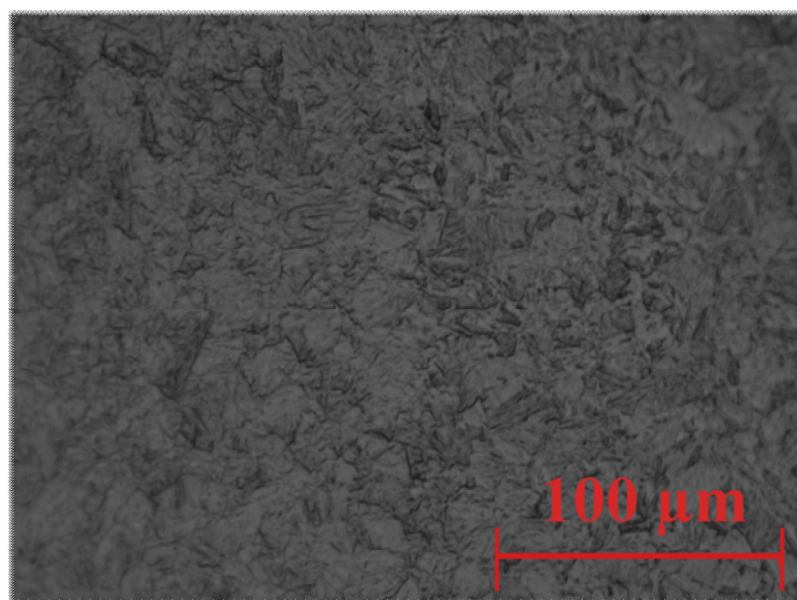
Struktura jádra je téměř čistě feritická, relativně rovnoměrná. Po vyválnování nebyl materiál normalizačně vyžíhán o čemž svědčí velmi nerovnoměrná velikost jednotlivých zrn. Mikrotvrдость v jádře oceli DC01A byla naměřena 102 HV 0,3.



Obr. 4.30 – Mikrostruktura oceli DC01A – jádro.

4.4.2 MIKROSTRUKTURA A MIKROTVRDOST OCELI DOCOL 1200M

Mikrostruktura materiálu DOCOL 1200M je feriticko – martenzitická. Materiál byl tepelně zpracovaný, o čemž svědčí rovnoměrnější velikost zrn.

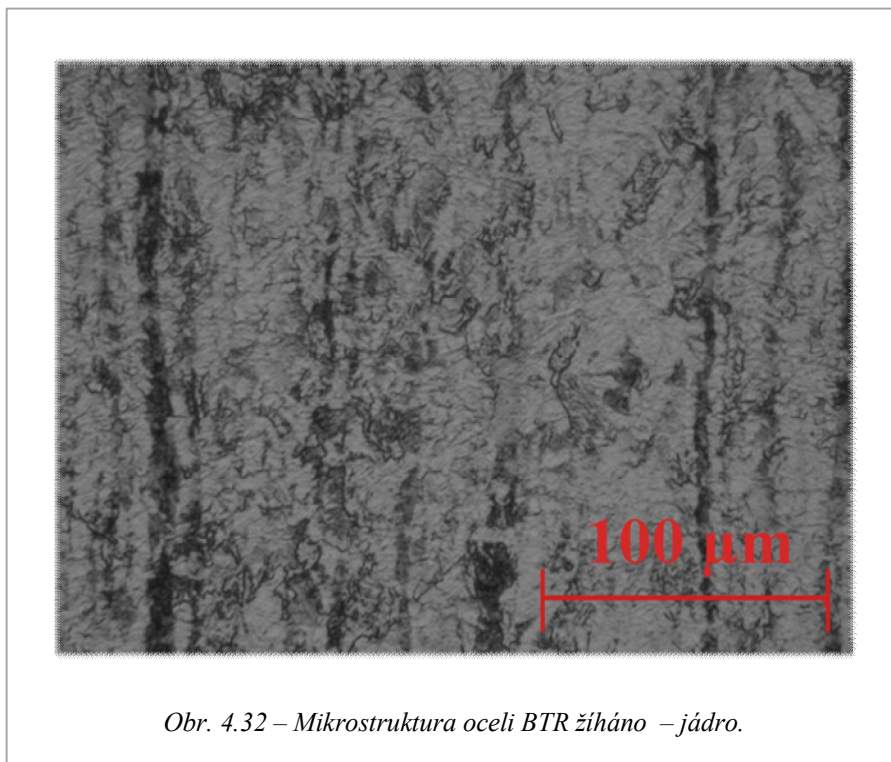


Obr. 4.31 – Mikrostruktura oceli DOCOL 1200M – jádro.

Mikrotvrдость v jádře oceli DOCOL 1200M byla naměřena 410 HV 0,3.

4.4.3 MIKROSTRUKTURA A MIKROTVRĐOST OCELI BTR 165 ŽÍHANÉ

Mikrostruktura materiálu BTR 165 žíhaného je feriticko - martenzitická. V mikrostruktuře jádra je patrný řádkovitý perlit.

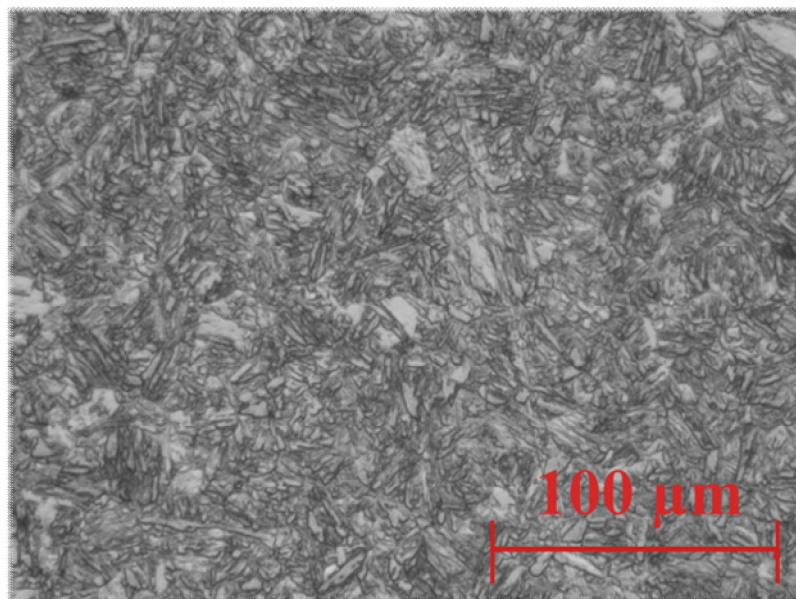


Mikrotvrдость v jádře oceli BTR 165 žíhané byla naměřena 233 HV 0,3.

4.4.4 MIKROSTRUKTURA A MIKROTVRĐOST OCELI BTR 165 TERMOMECHANICKY ZPRACOVANÉ

Struktura oceli BTR 165 termomechanicky zpracované je opět feriticko – martenzitická. Po termomechanickém zpracování je viditelné zjemnění struktury.

Mikrotvrдость v jádře oceli BTR 165 termomechanicky zpracované byla naměřena 480 HV 0,3. Což je o polovinu více než u oceli BTR 165, která nebyla termomechanicky zpracovaná.



Obr. 4.33 – Mikrostruktura oceli BTR termomechanicky zpracováno – jádro.

4.4.5 MIKROSTRUKTURA A MIKROTVRDOTOST OCELI TWIP 1200

Vyhodnocení mikrostruktury nebylo možné z důvodu nemožnosti naleptání vzorků. Důvodem je, že v současné době je minimální povědomost o leptadle, které by bylo vhodné pro chemické složení materiálu, jako je TWIP ocel. Jisté úspěchy byly zaznamenány na ČVUT v Praze. Bohužel složení leptadla je přísně tajeno laboratoří ČVUT.

TWIP ocel se řadí mezi TRIP oceli. Mikrostruktura je tvořena feritem, martenzitem a zbytkovým austenitem.

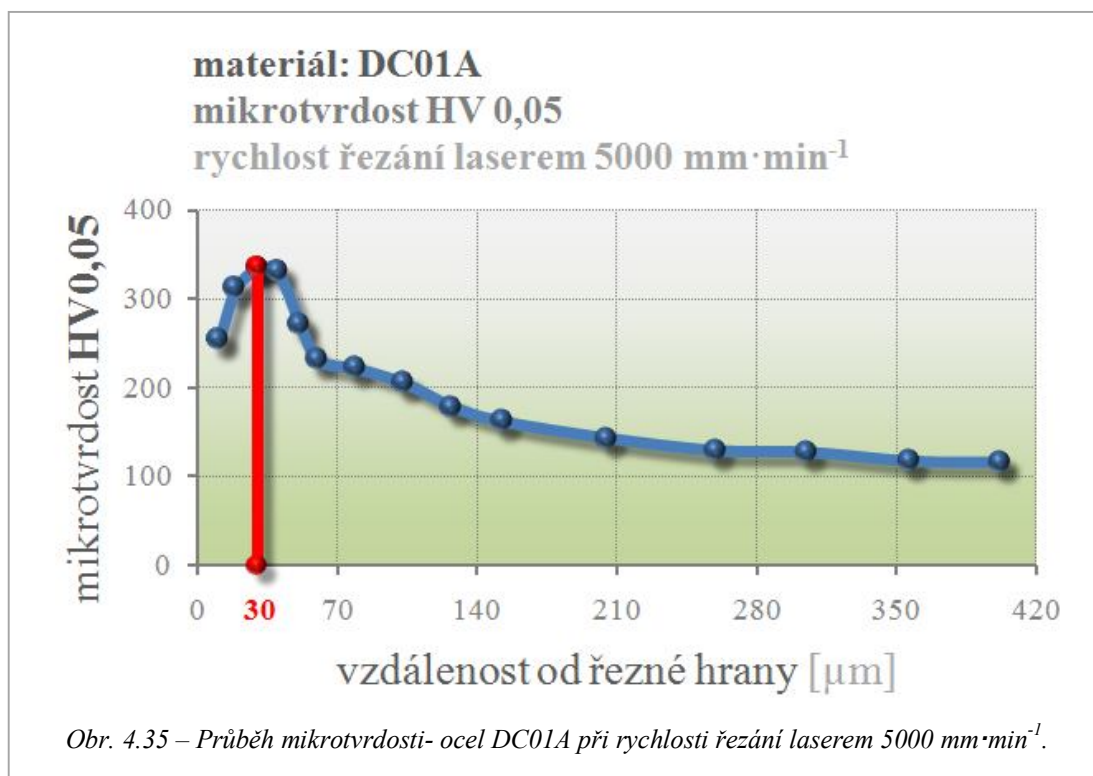
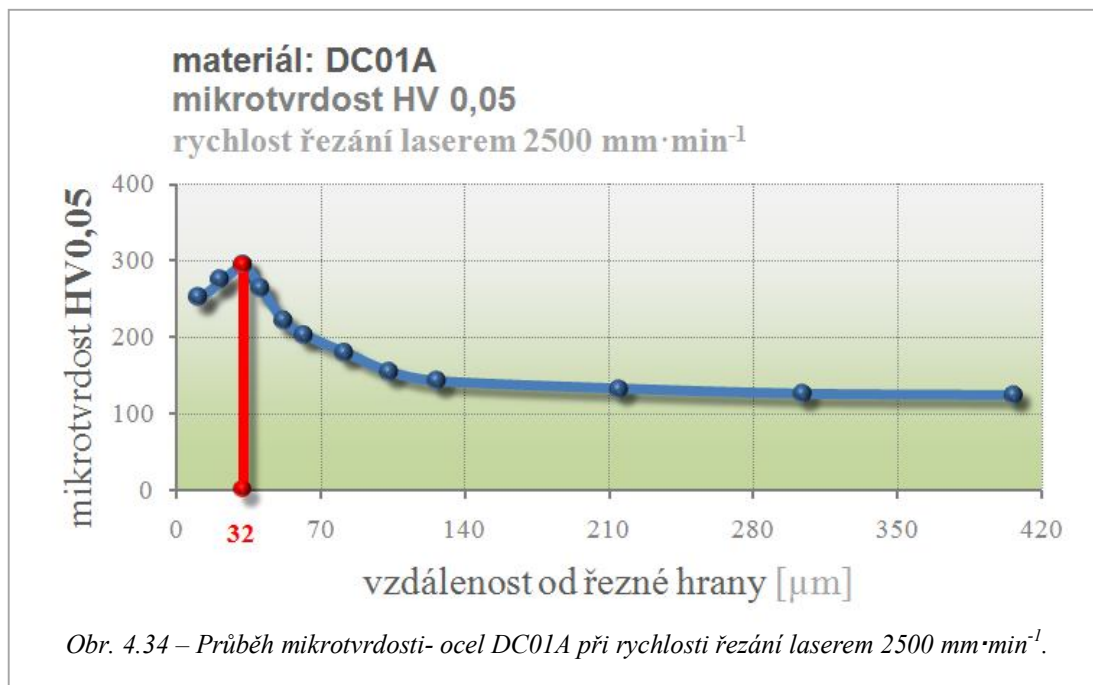
Mikrotvrdost v jádře oceli TWIP 1200 byla naměřena 290 HV 0,3.

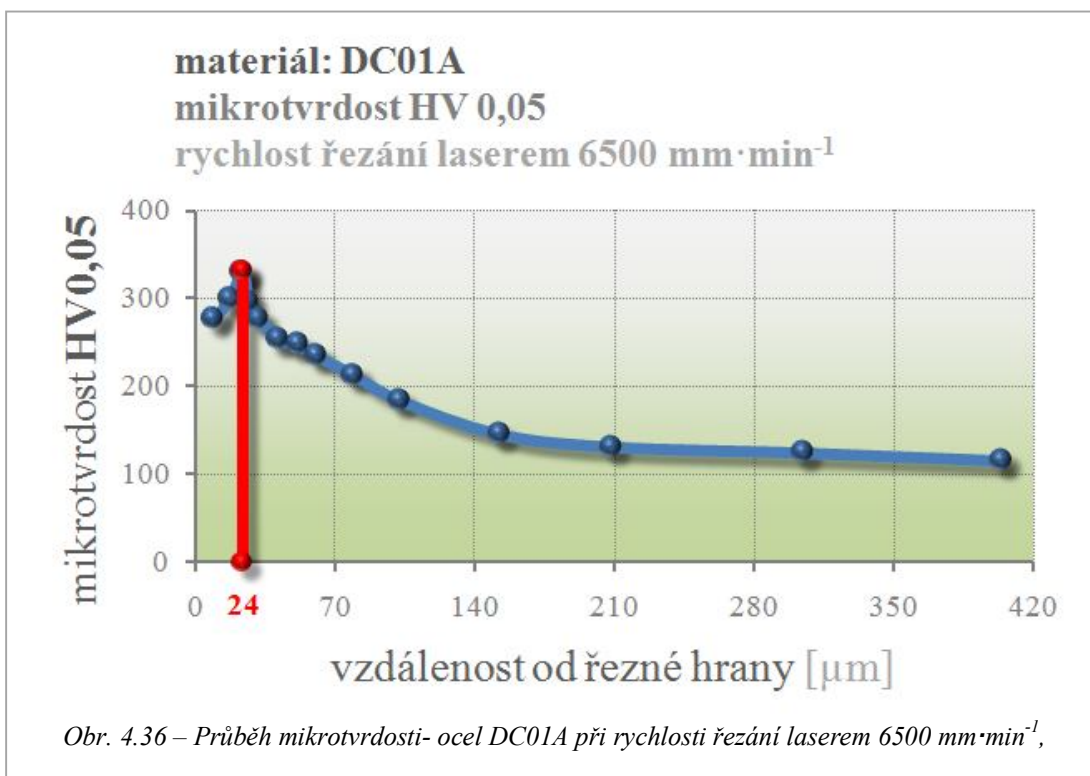
4.5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZY TEPELNĚ OVLIVNĚNÉ OBLASTI A MIKROTVRDOTOSTI

4.5.1 OCEL DC01A

V blízkosti povrchu vzorků, který byl řezán laserem, je mikrostruktura ovlivněná zahřátím na vysokou teplotu s relativně vysokou rychlostí ochlazení struktury. Na povrchu materiálu vzniklo oduhličení materiálu, jehož hloubka je závislá na rychlosti řezání laserem. Oduhličení je dobře patrné z průběhu mikrotvrdosti. Při řezání

rychlostí $2500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ je hloubka oduhličení $32 \text{ } \mu\text{m}$, při rychlosti $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ je hloubka $30 \text{ } \mu\text{m}$ a při rychlosti $6500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ je hloubka oduhličení $24 \text{ } \mu\text{m}$. Průběh mikrotvrdosti je na obr. 4.34, obr. 4.35 a obr. 4.36.

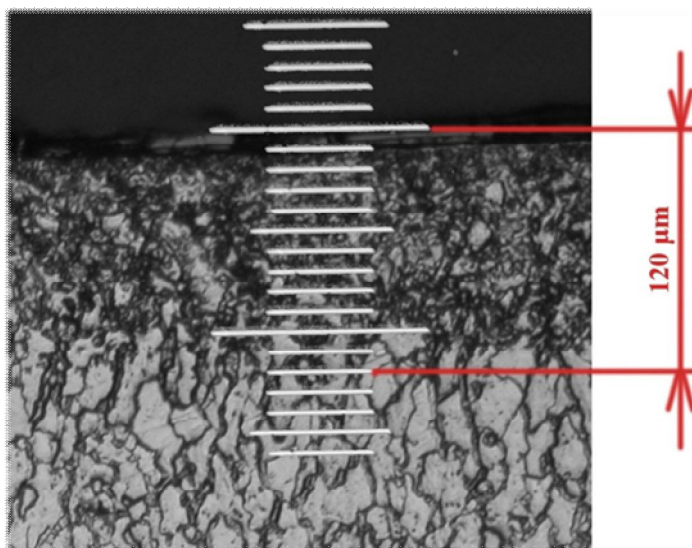




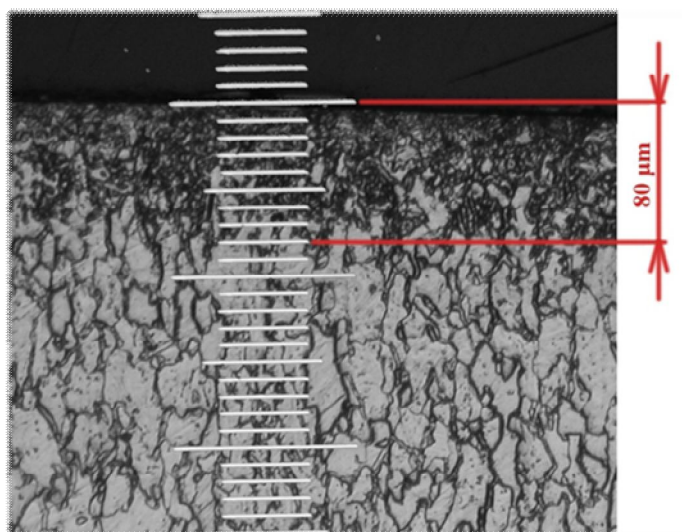
Celková tepelně ovlivněná oblast je patrná z průběhu mikrotvrlosti. Na snímcích z mikrostruktury není patrné celé přechodové pásmo. Proto je při vyhodnocování tepelně ovlivněná oblast sledována dvěma způsoby. Jednak tepelně ovlivněná oblast ze snímků mikrostruktury a tepelně ovlivněná oblast z průběhu mikrotvrlosti.

U velikosti tepelně ovlivněné oblasti ze snímků mikrostruktury je patrné pásmo tepelného ovlivnění. Oblast tepelně ovlivněné oblasti se u oceli DC01A nepatrně snižuje s rostoucí rychlostí řezání laserem. Při řezání laserem rychlostí 2500 mm·min⁻¹ je velikost tepelně ovlivněné oblasti 120 μm, při rychlosti 6500 mm·min⁻¹ je velikost oblasti 80 μm. Na obr. 4.37 a obr. 4.38 je znázorněn způsob odečtu tepelně ovlivněné oblasti z mikroskopických snímků.

Velikost tepelně ovlivněné oblasti z průběhu mikrotvrlosti byla určena podle průběhu křivky. Tam kde se začínala křivka linearizovat a hodnoty se blížily mikrotvrlosti jádra, byla stanovena hodnota, kde je konec tepelně ovlivněné oblasti. U oceli DC01A se při rychlosti řezání 2500 mm·min⁻¹ a 5000 mm·min⁻¹ velikost tepelně ovlivněné oblasti pohybovala okolo 240 μm, u rychlosti řezání 6500 mm·min⁻¹ byla velikost 210 μm.



Obr. 4.37 – Mikrostruktura oceli DC01A- rychlost řezání laserem $2500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (1 dílek = 0,01 mm).



Obr. 4.38 – Mikrostruktura oceli DC01A - rychlost řezání laserem $6500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (1 dílek = 0,01 mm).

Na mikrostruktuře při zvětšení 500x lze sledovat nízkouhlíkový martenzit v přechodové oblasti, který vznikl vlivem zakalení povrchu při řezání laserem.



Hloubku zakalení povrchu je možné vysledovat z mikrotvrdomosti, kdy je znatelná zvýšená tvrdost v povrchové části. A to až do hloubky 240 μm od povrchu řezu. Maximální tvrdosti byly naměřeny v oblasti zakalení povrchu a to až 335 HV 0,05.

Tab. 4.7 - Tepelně ovlivněná oblast - ocel DC01A

ocel DC01A			
rychlost řezání ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	2500	5000	6500
tepelně ovlivněná oblast z mikrostruktury	120 μm	100 μm	80 μm
celková tepelně ovlivněná oblast z mikrotvrdomosti	240 μm	240 μm	210 μm
oduhličení	32 μm	30 μm	24 μm
zakalení + přechodová oblast	od hloubky 32 μm do 240 μm	od hloubky 30 μm do 220 μm	od hloubky 24 μm do 200 μm
HV 0,05 max.	294	335	331

4.5.2 OCEL DOCOL 1200M

Na povrchu materiálu vzniklo opět oduhličení materiálu, jehož hloubka je závislá na rychlosti řezání laserem. Oduhličení je určeno z průběhu mikrotvrdomosti. Při řezání rychlostí 2500 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ je hloubka oduhličení 44 μm , při rychlosti 5000 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ je hloubka 40 μm a při rychlosti 6500 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ je hloubka oduhličení 30 μm .

Oblast tepelně ovlivněné oblasti ze snímků mikrostruktury se u oceli DOCOL 1200M snižuje s rostoucí rychlostí řezání laserem. Při řezání laserem rychlostí 2500 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ je velikost tepelně ovlivněné oblasti 140 μm , při rychlosti 5000 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ je velikost oblasti 130 μm , při rychlosti 6500 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 120 μm .

Celková tepelně ovlivněná oblast podle průběhu mikrotvrdomosti je 320 μm při nejvyšší rychlosti řezání, 300 μm při rychlosti 5000 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a 6500 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

Na průběhu mikrotvrdomosti bylo tedy sledováno oduhličení, zakalení, přechodová oblast a popuštění materiálu. Hodnoty pro jednotlivé rychlosti řezání jsou zaznamenány v tab. 4.8.

Maximální tvrdosti byly naměřeny od 448 HV 0,05 do 469 HV 0,05 v oblasti zakalení materiálu.



Tab. 4.8 - Tepelně ovlivněná oblast - ocel DOCOL 1200M

ocel DOCOL 1200M			
rychlost řezání ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	2500	5000	6500
tepelně ovlivněná oblast z mikrostruktury	140 μm	130 μm	120 μm
celková tepelně ovlivněná oblast z mikrotvrdosti	320 μm	300 μm	300 μm
oduhlíčení	44 μm	40 μm	30 μm
zakalení	od hloubky 44 μm do 82 μm	od hloubky 40 μm do 65 μm	od hloubky 30 μm do 60 μm
přechodová oblast	od hloubky 82 μm do 120 μm	od hloubky 65 μm do 123 μm	od hloubky 60 μm do 100 μm
popuštění	od hloubky 120 μm do 320 μm	od hloubky 123 μm do 300 μm	od hloubky 100 μm do 300 μm
HV 0,05 max.	469	448	468

4.5.3 OCEL BTR 165 žiháno

U oceli BTR 165 žihané byla sledována velikost oduhlíčení, zakalení a velikost přechodové vrstvy. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.9.

Tab. 4.9 - Tepelně ovlivněná oblast- ocel BTR 165 žiháno

ocel BTR 165 žiháno			
rychlost řezání ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	2500	5000	6500
tepelně ovlivněná oblast z mikrostruktury	110 μm	80 μm	80 μm
celková tepelně ovlivněná oblast z mikrotvrdosti	160 μm	130 μm	110 μm
oduhlíčení	41 μm	31 μm	40 μm
zakalení	od hloubky 41 μm do 52 μm	od hloubky 31 μm do 60 μm	od hloubky 40 μm do 80 μm
přechodová oblast	od hloubky 52 μm do 160 μm	od hloubky 60 μm do 130 μm	od hloubky 80 μm do 110 μm
HV 0,05 max.	537	600	554



Velikost tepelně ovlivněné oblasti se se zvyšující rychlostí řezání opět snižovala. Velikost zakalení v povrchové části se se zvyšující rychlostí zvětšovala. Hodnoty mikrotvrdosti byly maximální při řezání rychlostí $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

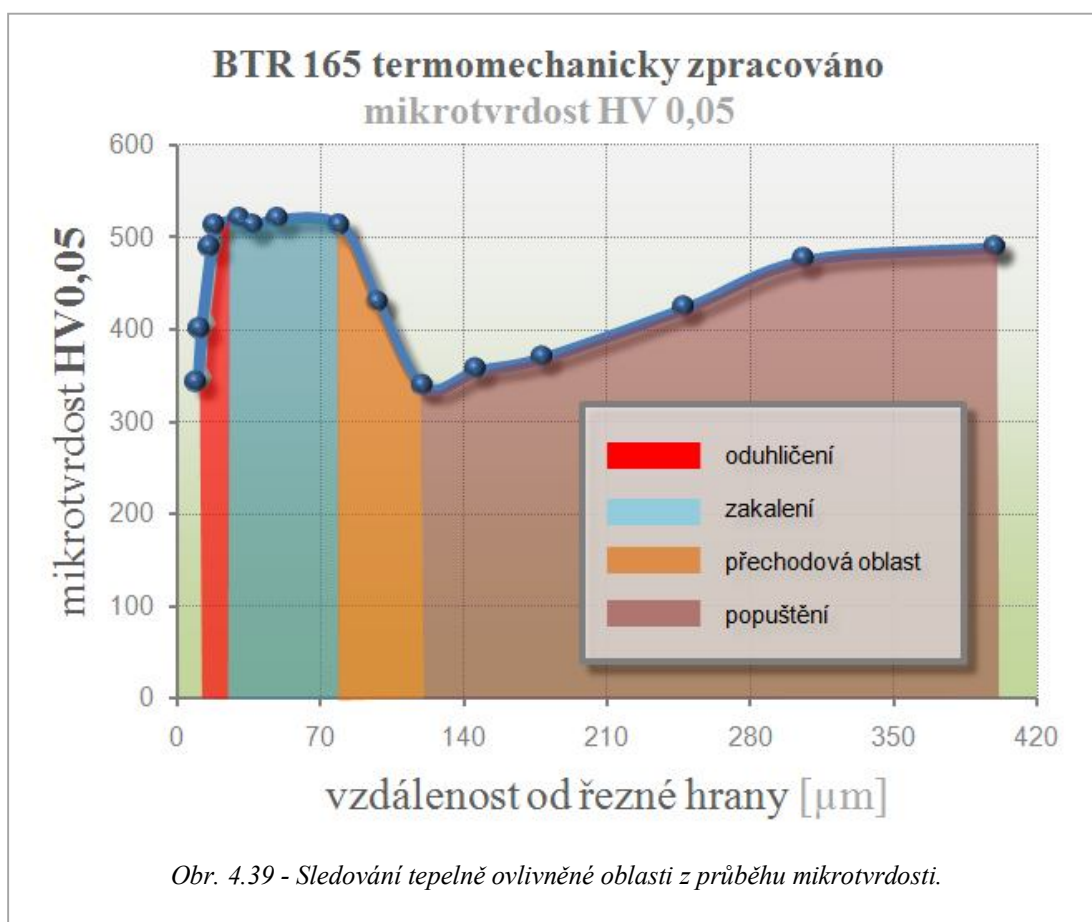
4.5.4 OCEL BTR 165 termomechanicky zpracováno

U oceli BTR 165 termomechanicky zpracované je znatelné rozšíření tepelně ovlivněné oblasti oproti oceli BTR 165, která nebyla termomechanicky zpracována. U oceli BTR 165 termomechanicky zpracované je celková oblast tepelně ovlivněné oblasti od $200 \mu\text{m}$ do $350 \mu\text{m}$. U oceli bez termomechanického zpracování je oblast od $110 \mu\text{m}$ do $160 \mu\text{m}$. Při řezáním laserem nastalo oduhličení povrchu, zakalení a popuštění materiálu.

Oblast zakalení je velmi dobře znatelná na průběhu mikrotvrdosti z obr. 4.39. Hloubka zakalení se v tomto případě zvětšuje se zmenšující se rychlostí řezání. Hodnoty maximální mikrotvrdosti jsou od $520 \text{ HV } 0,05$ do $537 \text{ HV } 0,05$.

Tab. 4.10 - Tepelně ovlivněná oblast - ocel BTR 165 termomechanicky zpracováno

ocel BTR 165 termomechanicky zpracováno			
rychlost řezání ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	2500	5000	6500
tepelně ovlivněná oblast z mikrostruktury	$150 \mu\text{m}$	$140 \mu\text{m}$	$110 \mu\text{m}$
celková tepelně ovlivněná oblast z mikrotvrdosti	$350 \mu\text{m}$	$240 \mu\text{m}$	$200 \mu\text{m}$
oduhličení	$19 \mu\text{m}$	$29 \mu\text{m}$	$29 \mu\text{m}$
zakalení	od hloubky $19 \mu\text{m}$ do $80 \mu\text{m}$	od hloubky $29 \mu\text{m}$ do $80 \mu\text{m}$	od hloubky $29 \mu\text{m}$ do $62 \mu\text{m}$
přechodová oblast	od hloubky $80 \mu\text{m}$ do $120 \mu\text{m}$	od hloubky $80 \mu\text{m}$ do $149 \mu\text{m}$	od hloubky $62 \mu\text{m}$ do $100 \mu\text{m}$
popuštění	od hloubky $120 \mu\text{m}$ do $350 \mu\text{m}$	od hloubky $149 \mu\text{m}$ do $240 \mu\text{m}$	od hloubky $100 \mu\text{m}$ do $200 \mu\text{m}$
HV $0,05 \text{ max.}$	520	533	537

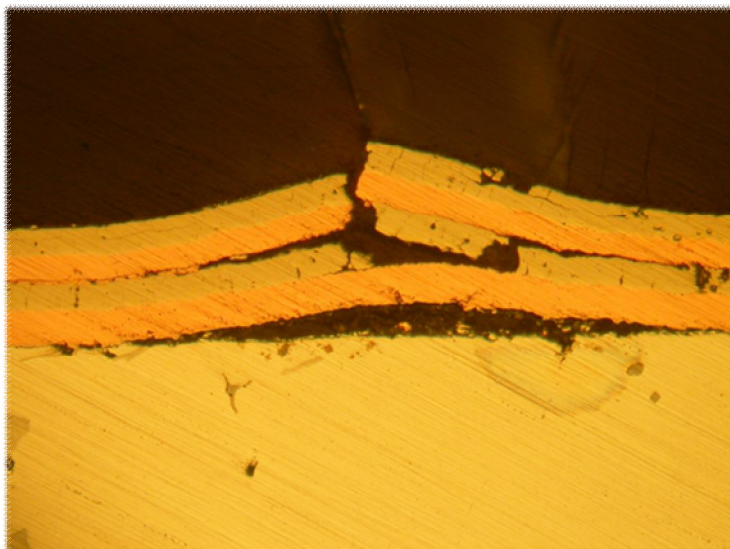


4.5.5 OCEL TWIP 1200

U oceli TWIP 1200 nebylo možné sledovat tepelně ovlivněnou oblast ze snímků mikrostruktury z důvodu výše zmíněné nemožnosti naleptání vzorků.

Tepelně ovlivněná oblast byla tedy posuzována pouze z výsledků mikrotvrdosti. Hloubka tepelně ovlivněné oblasti klesá se zvyšující se rychlostí řezání laserem. U TWIP oceli je patrné relativně velké oduhličení povrchu. Na obr. 4.40 je pro ukázkou znázorněn povrch oceli TWIP 1200 při rychlosti řezání $2500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Na povrchu jsou znatelné okuje, které vznikly při oduhličení povrchové části materiálu.

U oceli TWIP není patrná přechodová oblast. Z mikrotvrdosti je patrné oduhličení povrchu a jen mírné zakalení. Tvrdost v jádře je $290 \text{ HV } 0,3$, mikrotvrdost v zakalené části materiálu je $358 \text{ HV } 0,03$, což je jen nepatrný rozdíl.



Obr. 4.40 – Povrch OCELI TWIP 1200 s okujemi.

Tab. 4.11 - Tepelně ovlivněná oblast- ocel TWIP
1200

ocel TWIP 1200			
rychlost řezání (mm/min)	2500	5000	6500
celková tepelně ovlivněná oblast z mikrotvrdosti	170 μm	140 μm	130 μm
oduhlíčení	63 μm	42 μm	31 μm
zakalení	od hloubky 63 μm do 170 μm	od hloubky 42 μm do 140 μm	od hloubky 31 μm do 130 μm
HV 0,05 max.	360	341	359

5. ZÁVĚR

Na mikrosnímcích řezaného povrchu materiálů byl u všech typů materiálů patrný žlábkovitý tvar povrchu (např. viz obr. 4.19). Důvodem vzniku žlábků je vyfukování plynu v procesu řezání laserem. Na základě vizuální analýzy byla obecně pro všechny typy materiálů vyhodnocena z tohoto úhlu pohledu rychlost $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ jako optimální. Rychlosti $2500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ způsobila žlábků největší. Rychlost $6500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ způsobila žlábků méně patrné, ovšem výrazný otřep na spodní hraně řezu byl již za hranicí přijatelnosti. Ze sledování mikrosnímků řezaného povrchu vyplynul určitý předpoklad ovlivnění mechanických vlastností laserově řezaných vzorků prostřednictvím žlábků, které by eventuelně mohly působit jako iniciátory trhlin. Z toho důvodu byly následně provedeny zkoušky mechanických vlastností řezaných vzorků v kombinaci s měřením drsnosti řezaného povrchu a to ve směru kolmém na směr řezání viz obr. 3.5.

Statická zkouška tahem provedená na poměrných zkušebních tyčích (viz obr. 3.1) potvrdila necitlivost hodnot mechanických vlastností na použitý způsob výroby zkušebních vzorků tím, že naměřené hodnoty se od hodnot uvedených v materiálovém listu lišily statisticky nevýznamně. Je nutné ovšem připomenout, že výše uvedená prokázaná necitlivost se vztahuje pouze na porovnávací kombinaci výroby vzorků *LASEROVÉ ŘEZÁNÍ – NORMOVANÝ POSTUP VÝROBY VZORKŮ*. Praktickým výsledkem tohoto závěru je možnost výroby vzorků určených pro interní kontrolu šarží materiálů pomocí řezání laserem, které je velmi efektivní ve srovnání s normovaným způsobem výroby vzorků, který je nesporně časově náročnější a nákladnější. Platí ovšem, že za obecně prokazatelné a uznávané výsledky jsou vždy považovány výsledky získané použitím vzorků, které byly vyrobeny způsobem, který předepisuje norma ČSN EN 10002-1. Z tohoto důvodu lze výše zmíněný efekt úspory času a finančních prostředků uplatnit pouze na interní firemní úrovni např. pro rychlé a operativní odhalení případných neshodných šarží. Dále byla statisticky pomocí F-testu a T-testu prokázána necitlivost hodnot mechanických vlastností na variabilní parametr laserového řezání – rychlost řezání viz kap. 4.1. Tato skutečnost bude níže hodnocena v souvislosti s dalšími výsledky experimentální části této práce.

Maximální drsnost řezaného povrchu byla naměřena u všech typů materiálu při rychlosti $2500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, kdy absolutně největší hodnota R_z byla naměřena u vzorku BTR 165 termomechanicky zpracovaného a to $R_z = 19,7 \pm 1$. S nárůstem rychlosti

řezání na $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ vždy drsnost u všech materiálů poklesla. U materiálu BTR 165 žháno a DOCOL 1200M tento pokles pokračoval i při rychlosti $6500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Naopak u materiálu TWIP, BTR termomechanicky zpracovaného a DC01A byl prvotní pokles drsnosti povrchu v případě $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ vystřídán nárůstem drsnosti v případě rychlosti řezání $6500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Lze tedy říci, že pro většinu testovaných materiálů se optimum z hlediska drsnosti řezaného povrchu nachází na úrovni rychlosti řezání $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, jako hodnota, která leží přibližně mezi v praxi používaným minimem a maximem rychlosti řezání laserem. Minimální hodnoty podélné drsnosti řezaného povrchu byly naměřeny u BTR 165 termomechanicky zpracované, kdy $R_z = 7 \pm 2$ při rychlosti $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a mírně vyšší $R_z = 8,1 \pm 1$ při rychlosti řezání $6500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Obecným závěrem tohoto segmentu experimentální práce je pravděpodobné optimum z hlediska drsnosti řezaného povrchu ležící ve střední fázi možného rychlostního rozsahu řezání.

Tepelně ovlivněná oblast byla hodnocena analýzou snímků mikrostruktury a analýzou průběhu mikrotvrdosti. Šířka tepelně ovlivněné oblasti hodnocené ze snímků mikrostruktury byla o polovinu menší než hodnoty vyvozené z průběhu mikrotvrdosti (metodika měření viz obr. 3.7). Důvodem tohoto značeného rozdílu je skutečnost, že na rozdíl od snímků mikrostruktury lze pomocí analýzy průběhu mikrotvrdosti zohlednit i oblast přechodovou, která nesporně tepelně ovlivněnou oblast tvoří, ovšem snímky mikrostruktury ji jednoznačně nezobrazují. Celková šířka tepelně ovlivněné oblasti u všech druhů materiálu klesala se zvyšující se rychlostí řezání. Šířka tepelně ovlivněné oblasti byla zjištěna největší u oceli BTR 165 termomechanicky zpracované a DOCOL 1200M. Při rychlosti řezání $2500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ byla šířka tepelně ovlivněné oblasti u materiálu BTR 165 termomechanicky zpracováno $350 \mu\text{m}$ a u materiálu DOCOL 1200M $320 \mu\text{m}$. Při rychlosti $6500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ klesla velikost tepelně ovlivněné oblasti u BTR 165 termomechanicky zpracováno na $200 \mu\text{m}$ a u materiálu DOCOL 1200M velmi mírně na $300 \mu\text{m}$. Lze tedy konstatovat, že u materiálu DOCOL 1200M je výrazné tepelné ovlivnění povrchu materiálu, které prakticky neklesá se zvyšující se rychlostí řezání. U materiálu BTR 165 je velmi patrný rozdíl mezi dvěma typy této oceli. Materiál BTR 165 žháno vykazoval tepelně ovlivněnou oblast v šířce od $110 \mu\text{m}$ do $160 \mu\text{m}$, naproti tomu materiál BTR 165 termomechanicky zpracováno vykázal tepelně ovlivněnou oblast až do šířky, resp. hloubky $350 \mu\text{m}$. Důvodem tohoto významné

rozdílu je samozřejmě tepelné zpracování. U materiálu BTR 165 termomechanicky zpracováno a u DOCOL 1200M se jedná o tepelné zpracování na kontinuální žíhací lince a rychlé ochlazení z austenitické teploty. Při řezání laserem u materiálu DOCOL 1200M a BTR 165 termomechanicky zpracováno v tepelně ovlivněné oblasti vznikla pásma oduhličení, zakalení, přechodové oblasti a popuštění materiálu. Nejmenší tepelně ovlivněná oblast byla u oceli BTR 165 žíhané a oceli TWIP. Tepelně ovlivněná oblast opět klesala s rostoucí rychlostí. Tepelně ovlivněná oblast byla u oceli BTR 165 žíhané naměřena od 110 μm do 160 μm , tepelně ovlivněná oblast u TWIP oceli byla od 130 do 170 μm . Ocel DC01A měla tepelně ovlivněnou oblast od 210 μm do 240 μm . U ocelí DC01A, BTR 165 žíhané a TWIP byly z průběhů mikrotvrdosti patrná pásma oduhličení, přechodové oblasti a zakalení (příklad pro materiál BTR termomechanicky zpracováno viz obr. 4.39) Největší oduhličení povrchu nastalo u materiálu TWIP, kdy pásmo oduhličení zasahovalo až do hloubky 63 μm od řezaného povrchu. Naopak nejmenší oduhličení bylo vyhodnoceno u materiálu BTR 165 termomechanicky zpracováno, kde se toto pásmo nacházelo zhruba mezi 19 μm a 29 μm . Zvýšení mikrotvrdosti po zakalení povrchové vrstvy bylo největší u materiálu BTR 165 žíhané, kdy hodnota mikrotvrdosti v jádře byla 233 HV 0,05 a hodnota mikrotvrdosti v zakalené vrstvě až 600 HV 0,05. Nejmenší rozdíl v mikrotvrdosti jádra a zakalené vrstvy byl zjištěn u materiálu DOCOL 1200M, BTR 165 termomechanicky zpracováno a TWIP, kdy se hodnoty lišily maximálně o 70 HV 0,05. Celková tepelně ovlivněná oblast, tedy závisí na rychlosti řezání a na druhu materiálu, který je řezán. Tepelné zpracování při výrobě plechu přímo souvisí s tím, jak bude materiál teplotně ovlivněn.

Fotografie mikrostruktury umožnily lépe analyzovat tepelně ovlivněnou oblast z hlediska strukturních složek analyzovaných materiálů. Na snímcích mikrostruktury je například u oceli DC01A patrný nízkouhlíkový martenzit, který vznikl zakalením struktury. Dále bylo možné určit, který materiál byl před řezáním laserem tepelně zpracovaný, o čemž svědčí zjemnění mikrostruktury viz obr 4.39.

Na základě výše uvedeného lze říci, že již s ohledem na princip řezání laserem dochází v určitém pásmu přilehlém řezu k ovlivnění mikrostruktury materiálu, kdy volený technologický parametr rychlost řezání ovlivňuje šířku tohoto pásma – tepelně ovlivněné oblasti. Je zřejmé, že se změnou struktury materiálu v tepelně ovlivněné oblasti dochází ke změně vlastností materiálu v takové oblasti. Zkoušky



mechanických vlastností toto však neprokázaly. Důvodem této necitlivosti je zřejmě zanedbatelný podíl šířky tepelně ovlivněné oblasti na celkové (v rámci mechanických zkoušek nosné) šířce vzorku použitým v experimentální části této práce. V případě, že by se šířka tepelně ovlivněné oblasti podílela např. 50ti procenty na celkové šířce vzorku, pravděpodobně by ovlivněním této oblasti byly ovlivněny i mechanické vlastnosti. Přibližná šířka takových vzorků by se pohybovala s ohledem na maximální naměřenou šířku tepelně ovlivněné oblasti cca 300 μm kolem 1,5 mm. Tento závěr má jednoznačný praktický důsledek. Pro finální výrobky či polotovary, kde jsou řezné spáry od sebe vzdáleny více než 5 mm platí, že parametry řezání mohou být optimalizovány pouze s ohledem na výslednou kvalitu řezaného povrchu, protože vzniklá tepelně ovlivněná oblast tvoří zanedbatelný podíl na celkovém objemu výrobku, který udává výsledné vlastnosti. Naproti tomu v případě finálních výrobků či polotovarů, kde řezné spáry jsou od sebe velmi blízko – 5 mm a méně – je nutné brát v úvahu skutečnost, že rychlost řezání může způsobit určitou změnu mechanických vlastností způsobenou změnou struktury materiálu v takovém rozsahu, který již není zanedbatelný s ohledem na celkové rozměry. Doporučení pro další práce na toto téma spočívá tedy v návrhu takového experimentu, který by zkoumal vliv vzájemné vzdálenosti řezných spár na výsledné vlastnosti materiálu, jinak řečeno vliv šířky vzorků řezaných laserem na výsledné vlastnosti, zejména mechanické ve spojitosti se strukturní analýzou.



6. SEZNAM LITERATURY

- /1/ -, Opracování laserem, Trumpf, Ditzingen, 2000.
- /2/ ROUBÍČEK, M.: Konstrukce, Řezání CO₂ laserem, 2005.
- /3/ KÖNIG, J.: Sborník přednášek celostátní konference sváření, řezání a povrchového tepelného zpracování elektronovým paprskem a laserem, Praha, květen 1986.
- /4/ BITZEL, H., BORCHERDT, J., MÜLLER, J.: Faszination Blech, Raabe Verlags-GmbH, 1996.
- /5/ <http://www.atrix.cz/prakticka-prirucka/drsnost-povrchu/> (říjen 2009).
- /6/ <http://www.eduka.spaco.cz/wp-content/drsnost-povrchu.pdf> (říjen 2009).
- /7/ VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov, Alfa, Bratislava 1985.
- /8/ RUMÍŠEK, P.: Plošné a objemové tváření (vícejazyčné názvosloví), skripta VUT, Brno, 2004
- /9/ TSAKIRIS, V., EDMONDS, D.V.: Martensite and deformation twinning in austenitic steels, 1999.
- /10/ SOBOTKA, J.: Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů, Disertační práce, TU v Liberci, Liberec 2008.
- /11/ ČSN EN 10002-1: Kovové materiály-Zkoušení tahem- Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty, únor 2002.
- /12/ http://www.ssab.com/Global/DOCOL/datasheets_docol/en/207_Docol%20M.pdf (listopad 2009).
- /13/ <http://radekmusalek.com/Files/Radek%20Musalek%20%20SEMDOK2007.pdf> (listopad 2009).
- /14/ http://www.lindegas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_laser2 (listopad 2009).
- /15/ Laser Treatment of materials, Paper presented at the European Conference on Laser Treatment of Materials, DGM Informationsgesellschaft mbH, 1992.
- /16/ <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser> (listopad 2009).
- /17/ <http://www.physicsdaily.com> (listopad 2009).





PŘÍLOHY DIPLOMOVÉ PRÁCE

PŘÍLOHA 1: Materiálový list DOCOL 1200M

PŘÍLOHA 2: Materiálový list BTR 165

PŘÍLOHA 3: Materiálový list oceli DC01A

PŘÍLOHA 4: F –test, T-test

PŘÍLOHA 5: Záznam reliéfu řezaného povrchu



PŘÍLOHA 1: Materiálový list DOCOL 1200M

Docol [®]	C (%) typical	Si (%) typical	Mn (%) typical	P (%) typical	S (%) typical	Al (%) typical	Nb (%) typical	Ti (%) typical
Docol 500 LA	0,06	0,40	1,20	0,010	0,004	0,04	0,060	–
Docol 500 DP	0,08	0,30	0,65	0,010	0,010	0,04	–	–
Docol 500 DL	0,05	0,20	1,50	0,010	0,002	0,04	–	–
Docol 600 DP	0,11	0,40	0,90	0,010	0,002	0,04	–	–
Docol 600 DL	0,10	0,40	1,50	0,010	0,002	0,04	–	–
Docol 800 DP	0,13	0,20	1,50	0,015	0,002	0,04	0,015	–
Docol 800 DL	0,14	0,20	1,50	0,015	0,002	0,04	0,015	–
Docol 1000 DP	0,15	0,50	1,50	0,015	0,002	0,04	0,015	–
Docol 1000 DP + ZE	0,15	0,50	1,50	0,015	0,002	0,04	0,015	–
Docol 1200 M	0,11	0,20	1,60	0,015	0,002	0,04	0,015	–
Docol 1200 M + ZE	0,12	0,20	1,50	0,015	0,002	0,04	–	0,035
Docol 1400 M	0,17	0,50	1,60	0,015	0,002	0,04	0,015	–
Docol 1400 M + ZE ¹⁾	0,18	0,20	1,20	0,015	0,002	0,04	–	0,035
Docol Roll 800	0,15	0,50	1,50	0,010	0,002	0,04	0,015	–
Docol Roll 1000	0,17	0,20	1,50	0,010	0,002	0,04	0,015	–

Docol [®]	Yield strength		Yield strength after bake hardening	Tensile strength		Elongation		Minimum bending radius	
	R _{0,2} (N/mm ²)		R _{0,2} + BH ²⁾ (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)		A ₅ (%) t<3 mm	A ₅ (%) t≥3 mm	t ≤ 2 mm	2 < t ≤ 3 mm
	min	max	min	min	max	min	min	min	min
Docol 500 LA	500	620	–	570	710	12		1,0 x t	1,0 x t
Docol 500 DP	290	370	400	500	600	20		0 x t	
Docol 500 DL	230	300	350	500	600	24		0 x t	
Docol 600 DP	350	450	500	600	700	16		0 x t	
Docol 600 DL	280	360	420	600	700	20		0 x t	
Docol 800 DP	500	650	650	800	950	10		1,0 x t	
Docol 800 DL	390	540	550	800	950	13		1,0 x t	
Docol 1000 DP	700	950	850	1000	1200	7		3,0 x t	
Docol 1000 DP + ZE	700	950	850	1000	1200	7		3,0 x t	
Docol 1200 M	950		1150	1200	1400	3		4,0 x t	
Docol 1200 M + ZE	950		1150	1200	1400	3		4,0 x t	
Docol 1400 M	1150		1350	1400	1600	3		4,0 x t	
Docol 1400 M + ZE ¹⁾	1150		1350	1400	1600	3		4,0 x t	
Docol Roll 800	600	750	–	800	950	8		0,9 x t	
Docol Roll 1000	850	1100	–	1000	1200	5		1,5 x t	



PŘÍLOHA 2: Materiálový list BTR 165

Benteler Stahl/Rohr

Werkstoffe VI

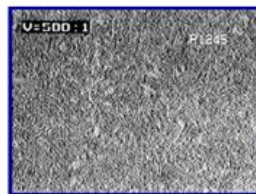
Wasservergütbare Stähle

Stahl	R _m	R _{eS}	A ₅	Anwendung
BTR 165 NBK soft	> 500 N/mm ²	> 400 N/mm ²	> 30 %	Werkstoff mit sehr guter Umformbarkeit zum Vergüten geeignet
BTR 165 vergütet	> 1400 N/mm ²	> 1100 N/mm ²	> 8 %	Höher beanspruchte Teile im Sicherheitsbereich Fertigung: IHU im Zustand NBK-soft → Vergüten des umgeformten Teils



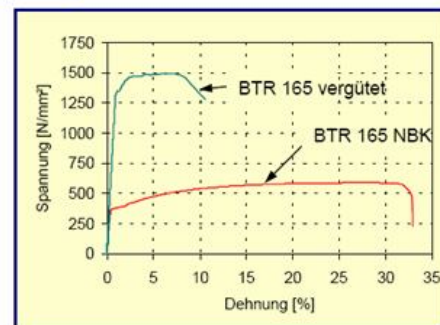
NBK soft

- speziell für Umformung geeignete Wärmebehandlung
- Ferritisch-perlitisches Gefüge



Vergütet

- Gefüge aus angelasem Martensit
- auch große Wanddicken vollständig durchvergütet





PŘÍLOHA 3: Materiálový list uhl. ocel DC01A

15.05.2009 10:49:33
C-2009-2868

TRUMPF LIBEREC, SPOL. S R.O.
AMPÉROVA 483
LIBEREC 23
463 12

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavila Feron, a.s. k zakázce č. 196112, s jednoznačným údajem pro
přifazení č. 52201 na množství 355 KG. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a
dodaným výrobkem.

Inspection certificate according to EN 10 204-3.1

U. S. Steel Košice, s.r.o.
Výrobní závod - ocelárna
150 00 KOŠICE
SLOVAK REPUBLIC

Order: 72888149/070
Work Order No: 80930943
A.S. Line No: 09/411022 01
Your order: 412024/A

Feron, a.s.
Polygrafická 3
108 33 PRAHA 10
Czech republic

METALLURGICAL CERTIFICATE NO: 09/411022 01

Desc. of product: COLD ROLLED STEEL SHEETS

Size: 2,000 x 1,500,0 x 3,030,0 mm
EN 10131/04

Standard: EN 10130/04

Qualitat: DC01 Aa

Spec. No: 40109501

Net Weight: 53 616 kg

MECHANICAL TEST RESULTS

Roll No. /Heat	Yield point Re (Rp)	Tensile strength Rm	Elongation A50	Impact en. KV J	Bend Test 180°				
	Min.	Min.	%						
	Max.	Max.							
4011533	40115	375	321	40,0					
4011534	40115	388	325	40,5					
4220134	52201	391	329	40,5					

CHEMICAL COMPOSITION

Heat No	C	Mn	Si	P	S						
40115	0,04	0,34	0,01	0,009	0,013						
52201	0,05	0,35	0,01	0,010	0,011						

NATURAL NUCLEI RADIOACTIVITY DOES NOT EXCEED VALUE OF 100 BQ/KG.
EN 10131:1999, 7.1.1.1.7 MATERIAL MEETS THE PRESCRIBED REQUIREMENTS.
JOSEF ČERNÝ, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE
e-mail: jcerny@stakosk.usa.com, tel.: +421-55-4737444

197-1

Leaf Page: 1
F-0/00/17-12/04-01-12

U. S. Steel Košice, s.r.o.
Výrobní závod U. S. Steel
celkové číslo výrobku
a číslo kvality
addresse Point quality
044 54 Košice



PŘÍLOHA 4:

Příklad statistického výpočtu závislosti drsnosti na rychlosti řezání laserem.

řezná rychlost [mm·min ⁻¹]	R _a [μm]						součet Y _i	střední hodnota y _i
2500	2,673	2,902	2,704	2,551	2,543	2,740	16,113	2,686
5000	2,254	1,260	1,350	1,133	1,115	1,323	8,435	1,406
6500	2,605	1,940	1,865	1,623	1,119	2,357	11,509	1,918
součet							Y _{xx} = 36,057	y _{xx} = 6,010

a) Formulace statistických hypotéz:

- základní hypotéza H₀: drsnost materiálu nezávisí na rychlost řezání
- alternativní hypotéza H₁: drsnost materiálu závisí na rychlosti řezání
- test při hladině významnosti 5%, jednostranný test.

b) Mezivýpočty:

- součty čtverců odchylek mezi úrovněmi:

$$Q_1 = \sum \frac{Y_{i,j}^2}{n_i} - \frac{Y_{xx}^2}{n} = \frac{16,113^2 + 8,435^2 + 11,509^2}{6} - \frac{36,057^2}{18} = 4,978 [\mu m]^2$$

- součet čtverců reziduální:

$$Q_2 = \sum \sum y_{i,j}^2 - \sum \frac{Y_{i,j}^2}{n_i} = 2,673^2 + 2,902^2 + \dots + 1,119^2 + 2,357^2 - \frac{16,113^2 + \dots + 11,509^2}{6} = 2,392 [\mu m]^2$$

- součet čtverců celkový:

$$Q_{celk} = Q_1 + Q_2 = 4,978 + 2,392 = 7,369 [\mu m]^2$$



- charakteristiky popisující variabilitu:

součet čtverců odchylek	rozptyl
mezi úrovněmi (rychlost řezání) $Q_1 = 4,978$	$\sigma^2_1 = 2,489$
reziduální (uvnitř rychlostí) $Q_2 = 2,392$	$\sigma^2_2 = 0,159$
celkový $Q_{\text{celk}} = 7,369$	$\sigma^2_{\text{celk}} = 0,433$

c) Testovací kritérium (vyhodnocuje vztah mezi statistickou hypotézou a vlastnostmi výběrového souboru):

$$T = \frac{\sigma^2_1}{\sigma^2_2} = \frac{2,489}{0,159} = 15,609.$$

Kde T je náhodná Fischerova veličina o $k_1 = 3 - 1 = 2$ a $k_2 = 18 - 3 = 15$.

d) Kritická hodnota testovacího kritéria:

- test je jednostranný, vzhledem k velikosti výběrového souboru je použita Fischerova náhodná veličina. Kritická hodnota je:

$$F_{kr} = F_{k1=2; k2=15} = 3,68.$$

c) Rozhodnutí o přijetí hypotézy H_0 :

- pro přijetí platí $T \leq F_{kr}$
- pro odmítnutí platí $T \geq F_{kr}$
- hypotéza H_0 je odmítnuta.

d) Drsnost materiálu je závislá na rychlosti řezání.



PŘÍLOHA 5: Záznam reliéfu řezaného povrchu - uhlíková ocel DC01A

Vzorek č. 2 (rychlost řezání $2500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$).

